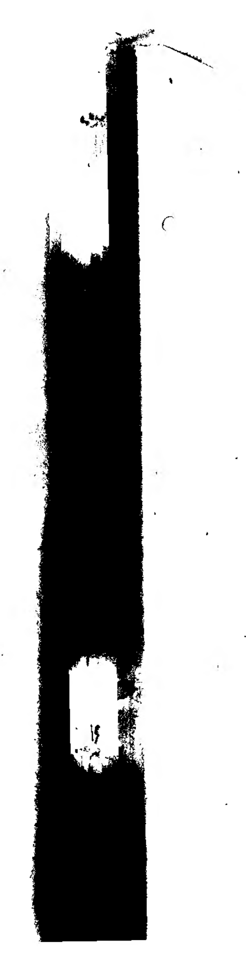
В. В. ЛАВРИНЕНКО,
И. А. КАРТАШЕВ,
В. С. ВИШНЕВСКИЙ

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ



Лавриненко В. В. и др.

Л 13 Пьезоэлектрические двигатели. Лавриненко В. В., Карташев И. А., Вишневский В. С. — М.: Энергия, 1980.

112 с. с ил.

30 к.

Рассмотрены конструкции и механизм работы различных пьезоэлектрических двигателей; приведены их характеристики. Даны рекомендации по инженерному проектированию указанных двигателей. Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой источников питания пьезоэлектрических двигателей, а также вопросы технологии изготовления двигателей и измерения их характеристик.

Книга предназначена для инженеров, работающих в области создания и применения электрических двигателей, а также для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием радиоэлектронной аппаратуры.

Л $\frac{30307\text{-}101}{051(01)\text{-}80}$ 127-80. 2302030000

ББК 31.261.3

6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге рассматриваются двигатели принципиально нового типа — пьезоэлектрические. Преобразование электрической энергии в механическую вращающегося ротора осуществляется в таких двигателях за счет пьезоэлектрического или пьезомагнитного эффекта, наблюдаемого в сегнетоэлектрических или ферромагнитных материалах. Необходимое механическое выпрямление упругих колебаний происходит в зоне фрикционного контакта ротора со статором.

Отсутствие обмоток и простота технологии изготовления не являются единственными преимуществами пьезоэлектрического двигателя. Высокая удельная мощность, большой к. п. д., широкий диапазон частот вращения и моментов на валу, отличные механические характеристики, отсутствие излучаемых магнитных полей и многие другие преимущества пьезоэлектрических двигателей позволяют рассматривать их как двигатели, которые в широких масштабах заменят применяемые в настоящее время электрические микромашины.

Работы по созданию и изучению пьезоэлектрических двигателей начаты в нашей стране в Киевском политехническом институте в 1964 г. С 1969 г. пьезоэлектрический двигатель изучается в Каунасском политехническом институте под руководством проф. К. М. Рагульскиса. В развитие направления создания электрических приводов на основе пьезоэлектрических двигателей существенный вклад внесли канд. техн. наук И. А. Слуцкий и П. Е. Васильев.

Большое значение для промышленного внедрения пьезоэлектрических двигателей имеют работы, проводимые в Ростовском государственном университете и во ВНИИреактивэлектрон (г. Донецк) по созданию высококачественной керамики для пьезоэлементов двигателей.

При научном содружестве многих организаций страны подготовлена основа для промышленного внедрения и серийного производства пьезоэлектрических двигателей и устройств на их основе. В настоящее время к серийному производству рекомендованы пьезопривод для электропроигрывающего устройства, разработанный конструкторами объединения «Эльфа» (г. Вильнюс), и пьезоэлектрический привод ведущего узла видеомагнитофона, созданный в объединении «Позитрон» (г. Ленинград).

За внешней конструктивной простотой пьезоэлектрического двигателя скрывается ряд физических явлений, которые сложнейшим образом взаимосвязаны между собой. Кроме того, освоение нового направления затрудняется также множеством существенно различных вариантов конструкций, реализующих десятки возможных решений. По этой причине очень важно подготовить читателя, и прежде всего инженерно-технических работников, к восприятию новой для них области техники перед началом промышленного выпуска пьезоэлектрических двигателей.

Для достижения этой цели авторы использовали свой опыт и результаты исследований Киевского политехнического института. Эти исследования проводились при активной поддержке научно-производственного объединения «Маяк» (г. Киев).

Авторы

Глава первая

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Пьезоэлектрическим двигателем называется электрический двигатель, в котором механическое перемещение ведомого органа (ротора или якоря) осуществляется за счет пьезоэлектрического или пьезомагнитного эффекта. Казалось бы, достаточно возбудить пьезоэлемент переменным электрическим напряжением и, используя известные механические средства, преобразовать колебательное движение пьезоэлемента во вращательное движение ведомого органа. Однако хотя этот принцип и прост, но его трудно реализовать для амплитуд и частот колебаний пьезоэлемента, которые встречаются на практике.

Известно несколько попыток создания ПД. В одной из конструкций зацепление ротора со статором осуществляется без проскальзывания [1]. Такой способ получения вращательного движения напоминает способ вращения диска телефонного аппарата. Авторы этой конструкции предложили при помощи трехфазного электрического поля изгибать пьезоэлемент одновременно в трех плоскостях так, чтобы его конец, поступательно перемещаясь, описывал круговую траекторию (рис. 1,*а*,*б*). На подвижном конце располагался штырь *1*, который фрикционно взаимодействовал с ротором *2*, приводя его во вращение. Практического применения эта конструкция не получила.

Уже давно было замечено, что вибрирующие тела могут поступательно перемещаться по гладкой поверхности. На основе этого явления были созданы различные механизмы для перемещения сыпучих тел и отдельных мелких деталей [2], преимущественно механизмы

транспортеров, ведущим органом которых является обычный электрический двигатель или электромагнит. В [3] описан такой же эффект, обнаруженный на ультразвуковых частотах при выполнении ведущего органа в виде ультразвукового ступенчатого концентратора и позволяющий с его помощью получать вращательное движение гладкого ротора. Автор указал на возможность создания на этом принципе электрического двигателя.

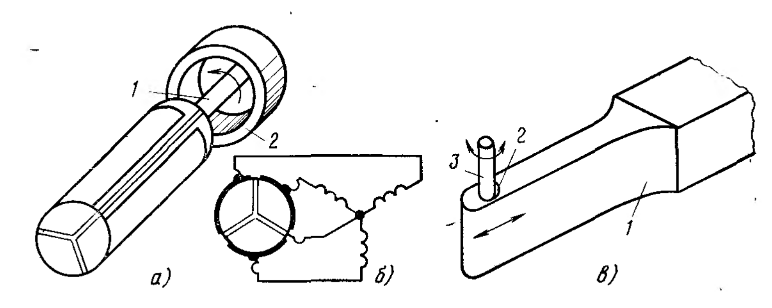


Рис. 1. ПД с центробежным прижимом.

Поиск принципиальных решений велся и в другом направлении. Рассмотрим вращение круглого карандаша, помещенного в стакан, который поступательным движением руки перемещается по замкнутой траектории. Вращение карандаша происходит под действием силы инерции, приложенной к центру тяжести карандаша, и силы трения в месте соприкосновения карандаша со стаканом.

Этот принцип преобразования поступательного движения во вращение ротора использован в ПД, описанном в [4]. Двигатель (рис. 1,*в*) содержит концентратор скорости *1*, возбуждаемый переменным электрическим напряжением высокой частоты. Полость *2* концентратора, двигаясь по окружности, вращает вставленный в нее ротор *3*.

Несмотря на оригинальность рассмотренного решения, практического развития оно не получило. Для того чтобы полость в роторе или статоре имела приемлемые размеры, ведущий орган должен колебаться с большой амплитудой. Увеличить амплитуду можно, только уменьшив частоту колебаний. Однако с понижением частоты

уменьшается и мощность, отдаваемая двигателем в нагрузку. Таким образом, требования увеличения амплитуды колебаний ведущего органа и мощности двигателя оказываются взаимно исключающими.

Большее практическое применение получили шаговые ПД, в которых используются анизотропные свойства контакта статора с ротором [5]. В этих двигателях (рис. 2,*а*) электромеханический преобразователь в виде камертона *1* или консольно закрепленного изгибного

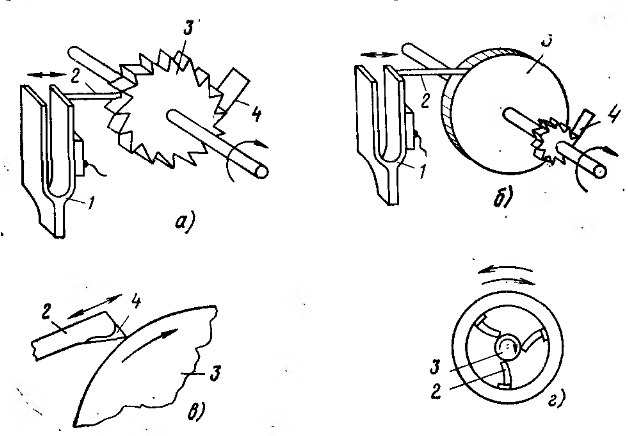


Рис. 2. Шаговые ПД.

элемента передает колебательное движение стержню *2*, который перемещает ротор *3* на один зуб. При движении стержня в обратном направлении собачка *4* фиксирует положение ротора *3*. Двигатель с аналогичным принципом действия (с фиксацией положения ротора) предложен в [6], причем ротор выполнен не зубчатым, а гладким (рис. 2,*б*).

Если собачку *4* расположить на конце стержня *2* (рис. 2,*в*), то отпадет необходимость в фиксирующем зубчатом колесе. При движении стержня в прямом направлении собачка заклинивает ротор, передавая ему импульс движения; при движении в обратном направлении происходит уменьшение трения (расклинивание).

Свойства заклинивания и расклинивания тел при определенных конфигурациях толкающего стержня были использованы в ПД, описанном в [7]. В этом двигателе (рис. 2,*г*) толкающие стержни *2* имеют на

концах башмаки специальной формы, обеспечивающие заклинивание при движении вперед и расклинивание при движении назад. Стержни приводятся в движение от пьезоэлемента, в котором возбуждаются крутильные колебания. Высокая частота крутильных колебаний обеспечивает практически непрерывное вращение ротора. Отсутствие сведений о параметрах таких двигателей, а также об их применении не позволяет дать им практической оценки.

Дискретный характер движения ротора двигателя с анизотропным контактом обеспечивает ему применение в качестве экономичного шагового двигателя. Особенно много патентов выдано на применение таких двигателей в часовых механизмах [8—11].

Мощность описанных выше конструкций в лучшем случае составляла сотые доли ватта, и использование их в качестве силовых приводов является проблематичным. Рассмотренные ПД могли лишь незначительно расширить область применения электрических двигателей, но они не могли с ними конкурировать.

2. ПРИНЦИП ВЕСЛА

Вспомним, как движется лодка по воде (рис. 3,*а*). За время, в течение которого весло касается воды, его движение преобразуется в линейное перемещение лодки; в паузах между гребками лодка движется по инерции. Такой принцип преобразования колебательного движения в линейное перемещение заложен в ПД, описанию которых посвящена настоящая книга.

Первый двигатель, основанный на этом принципе, был создан в Советском Союзе. При исследовании пьезоэлектрических трансформаторов было обнаружено едва заметное движение пьезоэлемента в держателе при возбуждении его электрическим напряжением. На основании обнаруженного эффекта и был спроектирован пьезоэлектрический двигатель [12].

Этот двигатель содержит пьезоэлектрический элемент *1* (рис. 3,*б*), выполненный в виде прямоугольной пластины, которая одним концом прижимается внешней силой к поверхности ротора *2*. При электрическом возбуждении пьезоэлемента этот конец, как и лопасть весла, перемещается по замкнутой траектории, периодически отдавая импульс движения ротору.

Чтобы выявить принципиальное отличие этого ПД от двигателя, описанного в [1], рассмотрим переходный процесс, начинающийся в момент включения обоих двигателей при отсутствии нагрузки на валу.

В двигателе, выполненном по [1] (рис. 3,*в*), поводок *1* находится в центре ротора *2* и не сцеплен с ним. По мере накопления энергии в пьезоэлементе поводок перемещается по спирали, не зацепляясь с ротором; при этом ротор не вращается. С момента сцепления поводка

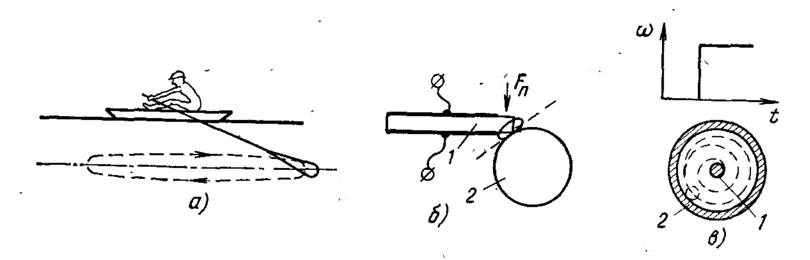


Рис. 3. Упрощенные схемы взаимодействия пьезоэлемента с ротором ($F_п$ — сила прижима).

с ротором движение поводка происходит по окружности постоянного радиуса с постоянной частотой вращения, равной частоте питающего напряжения и, следовательно, не зависящей от этого напряжения.

В двигателе, описанном в [12], пьезоэлемент в момент включения уже прижат к поверхности ротора; следовательно, с самого начала возбуждения колебаний их энергия преобразуется в кинетическую энергию вращения ротора. Чем больше частота и амплитуда колебаний, тем больше частота вращения ротора. Таким образом, частота колебаний пьезоэлемента не ограничена амплитудой его колебаний и, следовательно, диаметром ротора. Поэтому увеличивая частоту, можно увеличивать мощность на валу двигателя.

Ограничения мощности двигателя связаны с его перегревом, разрушением пьезоэлемента, повышенным износом контактирующих поверхностей и другими факторами. Однако эти явления наблюдаются при удельных мощностях, которые в несколько раз превышают мощности, характерные для лучших электромагнитных аналогов (по крайней мере с мощностью на валу менее 10 Вт).

3. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Как известно, некоторые твердые материалы, например кварц, способны в электрическом поле линейно изменять свои размеры. Железо, никель, их сплавы и окислы при наличии подмагничивающего поля или постоянного намагничивания также линейно изменяют свои размеры при изменении окружающего их магнитного поля. Первые из них относятся к пьезоэлектрическим материалам, вторые — к пьезомагнитным; соответственно различаются пьезоэлектрические и пьезомагнитные эффекты.

Пьезоэлектрический двигатель может быть выполнен как из тех, так и из других материалов. Однако усилия исследователей были преимущественно направлены на создание безобмоточных электрических двигателей; поэтому данные о ПД с магнитным возбуждением акустических колебаний в книге отсутствуют.

Известны прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты. Прямой эффект — это появление электрического заряда при деформации пьезоэлемента. Обратный эффект — это линейное изменение размеров пьезоэлемента при изменении электрического поля. Кристаллы, в которых наблюдается пьезоэлектрический эффект, обладают полярными свойствами. Они проявляются в том, что приложенные к кристаллу силы создают электрическое поле определенного направления. Поэтому при деформации поликристаллических (керамических) тел, состоящих из большого числа хаотически ориентированных кристаллов, суммарное электрическое поле окажется близким к нулю.

Существуют пьезоэлектрические материалы, названные сегнетоэлектриками, в которых направление полярной оси можно изменять при приложении достаточно сильных электрических полей. Под действием внешнего электрического поля полярные оси кристаллитов ориентируются преимущественно в одном направлении. После отключения поля кристаллиты имеют одинаковые направления полярных осей и оказываются как бы «замороженными». Такое свойство сегнетоэлектриков позволяет делать поликристаллические материалы полярными путем электрической обработки, которая называется поляризацией.

Практически пьезоэлемент ПД может быть выполнен из монокристаллического пьезоэлектрика. Однако сейчас из-за отсутствия кристаллов с требуемым набором свойств пьезоэлементы двигателя целесообразно изготовлять из дешевых пьезокерамических поликристаллических материалов. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только пьезокерамические материалы.

4. РЕЗОНАНС В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Если к пьезоэлектрической пластине с электродами на противоположных сторонах приложить электрическое напряжение, то на концах пластины возникнут силы сжатия и расширения [13]. Рассмотрим волну, которая зарождается, например, на левом конце пьезопластины (рис. 4,*а*). Эта волна распространяется в продольном направлении и достигает противоположного конца пластины. Затем она отражается от него, не изменяя фазы, и направляется обратно к левому концу пластины, отражается от него и т. д. до тех пор, пока за счет механических и электрических потерь в пластине волна не затухнет.

При сжатии (или расширении) смещение частиц происходит в том же направлении, в каком происходит распространение волны. Такие волны называются продольными в отличие от поперечных, у которых смещение частиц перпендикулярно направлению их распространения.

В рассматриваемом случае направление электрического поля было перпендикулярно направлению распространения волны. Возможен также случай, когда электроды расположены на торцах пьезопластины. Тогда направление электрического поля параллельно направлению распространения волны. В соответствии с этим различают поперечный и продольный способы возбуждения продольных колебаний или волн [14].

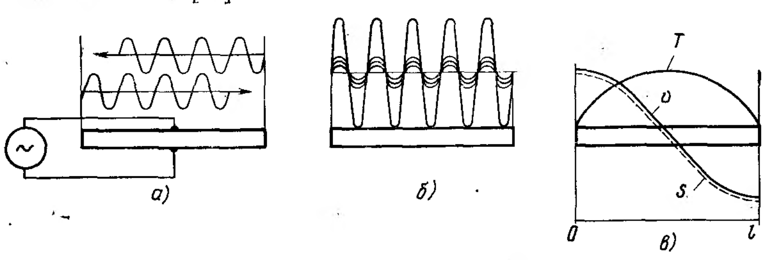


Рис. 4. Распределение деформаций вдоль пьезоэлемента.

До сих пор рассматривалась бегущая волна. Если сложить все прямые и отраженные бегущие волны в пьезопластине, то получим кривую распределения смещений в стоячей волне (рис. 4,*б*). Амплитуда смещений в такой волне максимальна тогда, когда на длине пьезопластины укладывается целое число полуволн. Это условие выполняется для определенных частот возбуждения пьезопластины f_m, названных резонансными.

Условие резонанса имеет вид:

$$f_m = c/\lambda = cm/2l,$$

где c — скорость звука в пьезопластине; λ — длина волны возбуждаемых колебаний; m — номер моды колебаний, т. е. число, показывающее, сколько полуволн укладывается на длине l пьезопластины; первую моду называют также основной.

Скорость звука в пьезоэлектрической пластине, в которой возбуждаются продольные колебания, определяется по формуле

$$c = \sqrt{Y_1^E/\rho},$$

где $Y^E{}_1$ — модуль Юнга; ρ — плотность материала.

Поэтому условие резонанса имеет вид:

$$f_m = \sqrt{Y_1^E/\rho}\, m/2l.$$

Эта формула используется для определения длины пьезоэлемента по заданной рабочей частоте двигателя в случае, когда пьезоэлемент выполнен в виде прямоугольной пластины с электродами на боковых поверхностях.

Рассмотрим основную моду продольных колебаний пьезоэлемента, в котором возбуждены стоячие волны. Положение равновесия каждое сечение проходит с максимальной скоростью. Каждая координата x характеризуется своими значениями амплитуд напряжения T, смещения S и колебательной скорости v; эпюры их распределения по длине образца показаны на рис. 4,*в*.

Таким образом, для свободного пьезоэлемента при основной моде продольных колебаний механическое напряжение максимально в месте минимума колебательных скоростей или смещений. На концах свободного пьезоэлемента напряжение равно нулю, а смещение и колебательная скорость максимальны.

Так как эпюры получены в результате сложения отрезков синусоидального напряжения, результирующая кривая имеет форму синусоиды.

5. ПОПЕРЕЧНАЯ СИЛА

Как известно, действие постоянной силы F на конце консольно закрепленной балки эквивалентно одновременному действию сил, вызывающих сдвиг балки (рис. 5,*а*), и момента сил, вызывающих «чистый» изгиб (рис. 5,*б*) [15]. Напомним, что «чистый» изгиб в незакрепленной пластине наблюдается тогда, когда на ее концах приложены моменты равные, но противоположные по знаку (рис. 5,*в*). При этом плоскости пластины, изгибаясь, становятся цилиндрическими поверхностями, радиус которых тем меньше, чем больше изгибающие моменты.

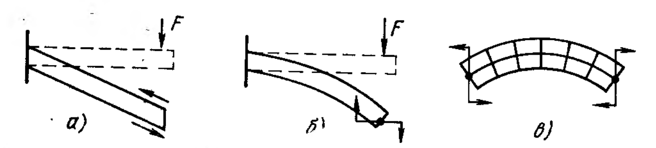


Рис. 5. Деформации сдвига и изгиба балки.

В дальнейшем будем рассматривать преимущественно случай резонанса. Поскольку резонансные частоты колебаний сдвига пьезоэлемента обычно значительно превышают рабочие частоты двигателя, нерезонансные смещения при колебаниях сдвига можно не учитывать.

Итак, поперечная сила, приложенная к торцу пьезопластины, вызывает изгибные деформации. Если эта сила изменяется во времени, например, по гармоническому закону, то на торце пьезопластины возникают бегущие поперечные волны, которые отражаются от второго торца, возвращаются к первому торцу, отражаются от него и т. д.

Образование поперечной стоячей волны аналогично образованию продольной волны. Пьезопластина может резонировать на разных частотах, соответствующих различным номерам мод изгибных колебаний. Разница заключается лишь в том, что скорость звука для продольных колебаний мало зависит от длины волны. Скорость распространения изгибных колебаний значительно меньше скорости распространения продольных колебаний сжатия — расширения и возрастает по мере уменьшения длины волны, приближаясь в предель-

ном случае к скорости распространения продольных волн. Указанное отличие приводит к тому, что резонансные частоты с увеличением номера моды колебаний возрастают не пропорционально (как для колебаний сжатия — растяжения), а как числа 1; 2,76; 5,43; 8,94; 13,37 ... Это справедливо при условии, что длина волны более чем в 10 раз больше толщины пьезоэлемента.

Для ПД последнее условие, как правило, не выполняется. Поэтому для определения резонансных частот изгиба необходимо пользоваться формулой [16]

$$f_{\text{изг}} = \frac{\pi a (m + 1/2)^2}{2l^2} \sqrt{\frac{Y_1^E}{12(1-\sigma^2)\rho}}, \qquad (1)$$

где a — толщина пьезоэлемента; σ — коэффициент Пуассона.

Эта формула приводит к погрешности, превышающей 20%, и приемлема в основном для качественного анализа. При практических расчетах вычисленные значения частоты уточняют экспериментально.

6. ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ КОНЦА ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА В МЕСТЕ КОНТАКТА С РОТОРОМ

Если маятнику сообщить движение в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то он будет описывать эллипс, отношение осей которого зависит от амплитудных и фазовых соотношений между вынуждающими силами. При равенстве амплитуд этих сил и сдвиге фаз на 90° маятник будет двигаться по окружности. Аналогично, если в пьезоэлементе одновременно возбуждены взаимно перпендикулярные несвязанные (или слабо связанные) колебания, то конец пьезоэлемента A движется по эллипсу (рис. 6,*а*).

Два типа колебаний назовем несвязанными, если одно из них не возбуждает другое, т. е. если они существуют независимо. Примером несвязанных колебаний являются продольные и изгибные колебания. Примером связанных колебаний могут служить продольные колебания по длине и ширине пьезопластины, а также изгибные колебания по ее длине и ширине. Если колебания являются связанными, то на резонансных частотах сдвиг фаз между ними равен нулю.

Рассмотрим два взаимно перпендикулярно расположенных пьезоэлемента (рис. 6,*б*), в которых возбуждены продольные колебания со сдвигом фаз 90°. Казалось бы, если соединить концы пьезоэлементов (точки A), то точка соединения будет двигаться по окружности. На самом же деле траекторией движения будет прямая, показанная на рисунке пунктиром. При акустическом соединении пьезоэлементов (в точках A) продольные волны проникают из одного элемента в другой. Смешиваясь между собой, они становятся в точке соединения неразличимыми.

Если в пьезоэлементе возбуждены продольные и изгибные колебания одной частоты, то при сдвиге фаз

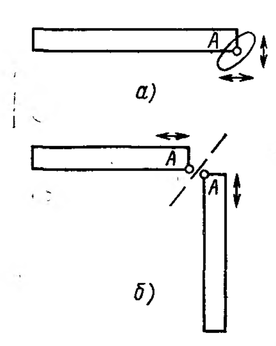


Рис. 6. Траектории движения точек на концах пьезоэлементов.

между ними, отличном от нуля, траекторией движения точки A является эллипс. Назовем угол сдвига фаз между возбуждаемыми колебаниями углом траектории ψ. Для одинаковых амплитуд продольных и изгибных колебаний ($A_п = A_и$) траектории движения точек на торце пьезоэлемента показаны на рис. 7,*а*, а для разных амплитуд — на рис. 7,*б*. Возможно также движение точки по замкнутой кривой с постоянной скоростью. В нерезонансном режиме такое движение происхо-

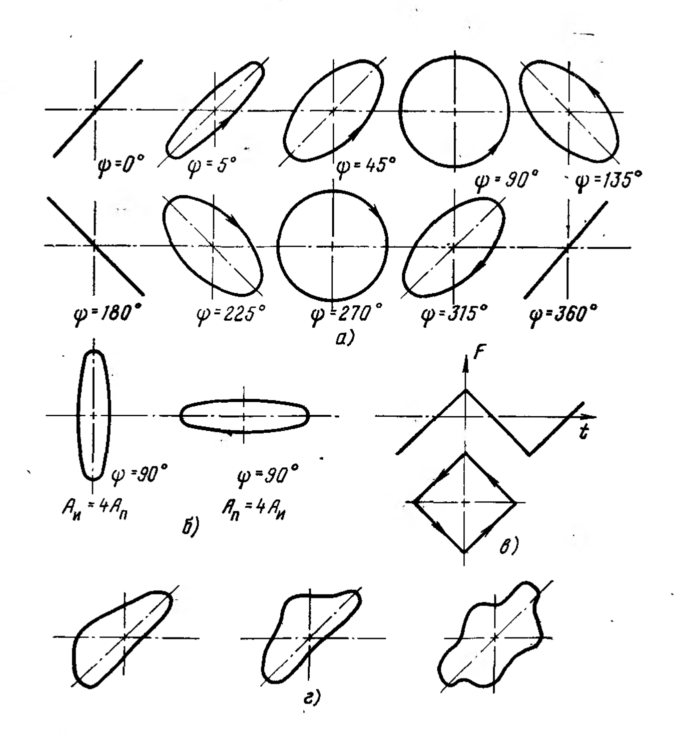


Рис. 7. Траектории движения точек на концах пьезоэлементов при различных соотношениях между амплитудами продольных и изгибных колебаний.

дит под действием вынуждающей силы, изменяющейся по закону пилы (рис. 7,*в*). При полигармоническом изменении вынуждающей силы форма эллипса искажается (рис. 7,*г*) [17].

Поперечная сила на конце продольно смещающегося пьезоэлемента возникает при его взаимодействии с поверхностью ротора. Эта сила пропорциональна смещению и совпадает с ним по фазе. Для понимания принципа работы двигателя важно знать фазовые соотношения между взаимно перпендикулярными колебаниями. На рис. 8 показаны частотные зависимости амплитуды смещения S и сдвига фаз φ между смещением и электрическим напряжением вблизи резонанса для первой моды продольных колебаний пьезоэлемента. В окрестности резонанса сдвиг фаз меняется от нуля до π, на частоте резонансов $f_р$ он равен $\pi/2$. По такому же закону изменяются амплитуда и фаза смещения конца пьезоэлемента в поперечном направлении; отличие заключается в том, что разность фаз отсчитывается от фазы смещения конца пьезоэлемента в продольном направлении.

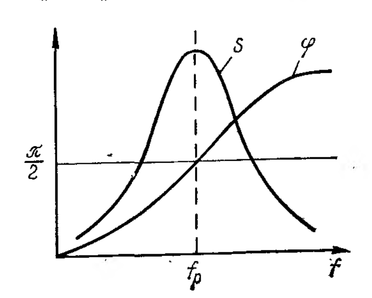


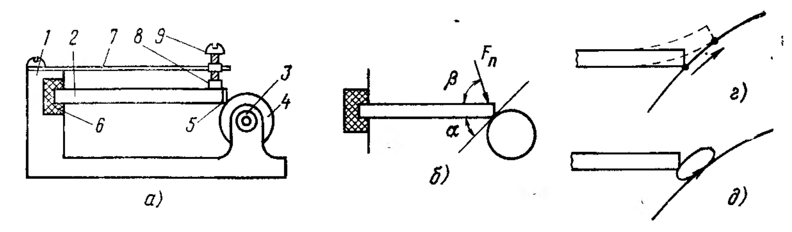
Рис. 8. Частотные зависимости амплитуды смещения S и сдвига фаз φ между смещением и электрическим напряжением пьезоэлемента.

7. ЭЛЕМЕНТЫ ПД И ОПИСАНИЕ ЕГО РАБОТЫ

Рассмотрим ПД широко применяемой конструкции (рис. 9,*а*). Основными элементами двигателя являются статор и ротор. На основании статора *1* установлены пьезоэлемент *2* и подшипники *3*. К основанию крепится также корпус (на рисунке не показан); корпус в некоторых случаях может быть совмещен с основанием. В качестве основания могут использоваться панели, шасси приборов, например панель лентопротяжного механизма магнитофона. Ротор *4* обычно выполняется из твердых материалов (сталь, чугун, твердый сплав, керамика и др.); он представляет собой тело вращения с гладкой поверхностью. Если необходимо получить слож-

ную угловую зависимость для момента вращения, ротор должен иметь форму эксцентрика с одним или несколькими выступами.

Неотъемлемой частью ПД является акустически изолированная от основания и оси ротора электромеханическая колебательная система — осциллятор (вибратор).



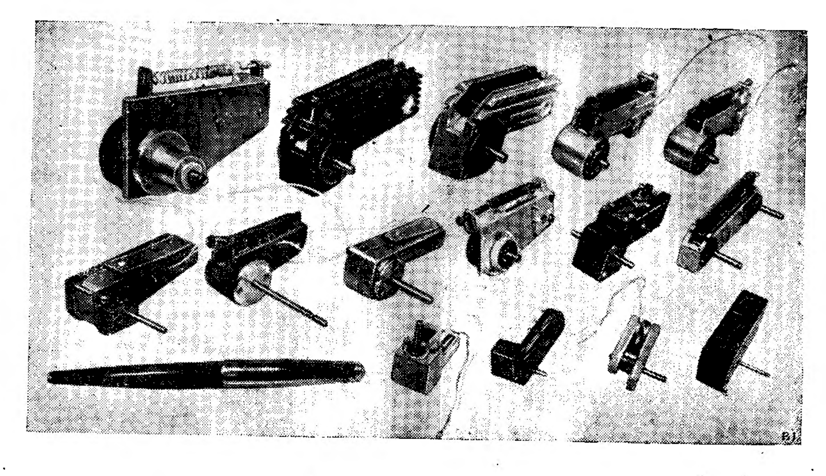


Рис. 9. Конструкция ПД.

В простейшем случае осциллятором является пьезоэлемент вместе с износостойкой прокладкой *5*. Если осциллятор выполнен в виде прямоугольной пластины, то ее конец прижат к поверхности ротора, а другой закреплен на основании с помощью эластичной прокладки *6*, например, из фторопласта, резины и пр.

Важной частью ПД является элемент прижима; он может быть выполнен в виде плоской стальной пружины *7*, конец которой через эластичную прокладку *8* давит на конец осциллятора. Для изменения силы прижима на конце пружины часто устанавливают регулировочный винт *9*. Угол β между направлением силы прижима и поверхностью осциллятора называется углом прижима (рис. 9,*б*). Осциллятор касается поверхности ротора под определенным углом, называемым углом контакта α. Этот острый угол образован плоскостью, параллельной продольной оси осциллятора, и касательной плоскостью, проходящей через линию контакта осциллятора с ротором.

Внешний вид лабораторных и опытных образцов ПД этой конструкции приведен на рис. 9,*в*.

При создании модели ПД авторами были приняты следующие предположения:

1. Поперечные колебания являются изгибными и возбуждаются при отражении продольных колебаний от поверхности ротора.

2. Вращение ротора обусловлено заклиниванием при смещении конца осциллятора в одном направлении и расклиниванием при смещении в обратном направлении.

Эксперименты, выполненные авторами, окончательно подтвердили механизм фрикционного взаимодействия несвязанных продольных и изгибных колебаний осциллятора и позволили создать модель, иллюстрирующую основные физические процессы в ПД. Согласно этой модели при подключении двигателя к источнику переменного напряжения с частотой, близкой к резонансной частоте продольных колебаний, в осцилляторе устанавливаются стоячие продольные волны.

Будем считать, что осциллятор касается ротора в одной точке при одномерной модели и вдоль линии при двумерной модели. Эту точку или линию назовем контактной. Контактная точка, смещаясь в продольном направлении, перемещается с поверхностью ротора (рис. 9,*г*), а следовательно, смещается и в поперечном направлении. Часть поверхности ротора, с которой взаимодействует контактная точка (линия) в течение одного периода колебаний, назовем зоной контакта. Таким образом, перемещение контактной точки в зоне контакта приводит к появлению поперечной составляющей силы, которая возбуждает стоячие волны изгиба на частоте, близкой к резонансной. В результате контактная точка дополнительно смещается в поперечном направлении за счет резонансных изгибных колебаний. Сдвиг фаз между продольными и изгибными колеба-

ниями может изменяться в пределах от 0 до 180° в зависимости от соотношения между выбранной рабочей частотой двигателя и резонансной частотой колебаний изгиба. При сдвиге фаз, отличном от 0 и 180°, контактная точка движется по эллипсу (рис. 9,*д*). В момент соприкосновения с ротором она прижимается к его поверхности, входит во фрикционное зацепление и передает ротору однонаправленный импульс движения. При этом осциллятор получает импульс поперечной силы, компенсирующий потери энергии изгибных колебаний.

8. ВЫБОР РАЗМЕРОВ ОСЦИЛЛЯТОРА

В первых ПД мощность на валу не превышала десятых долей ватта, а к. п. д. составлял всего лишь несколько процентов. Параметры часто имели случайный характер. Например, на одном из ПД был зафиксирован к. п. д., равный 40%. Однако результат оказался невоспроизводимым даже для данного двигателя.

На характеристики ПД влияли размеры и конструкции ротора, осциллятора, элементов крепления и прижима, углы контакта и прижима, износ пьезоэлемента и другие факторы. Установление механизма взаимодействия продольных и поперечных колебаний открыло широкие возможности для значительного улучшения параметров двигателей.

Чтобы понизить напряжение питания ПД, исследователи стремились уменьшить толщину осциллятора. Но это в соответствии с формулой (1) приводило к увеличению номера моды изгибных колебаний. Вместо необходимых второй, третьей или четвертой мод колебаний возбуждались более высокие (выше десятой). Если для высших мод колебаний случайно подбиралось необходимое соотношение между резонансными частотами продольных и изгибных колебаний, то сохранить его при воздействии дестабилизирующих факторов было невозможно.

Так как в контактной точке продольные и поперечные колебания осциллятора взаимодействуют, фазовые соотношения между ними должны существенно влиять на параметры двигателя. Следовательно, для эффективного возбуждения колебаний изгиба рабочую частоту ПД необходимо выбирать не только в области резонансных частот продольных колебаний, как это считалось раньше, но и в области резонанса колебаний изгиба.

При нерезонансном возбуждении продольных колебаний напряжение питания двигателя пришлось бы увеличить в десятки раз.

Оптимальное соотношение между резонансными частотами продольных и изгибных колебаний достигается согласованием длины и толщины осциллятора. Грубое согласование размеров можно произвести из условия равенства частот *n*-й моды продольных и *m*-й моды изгибных колебаний; этому равенству соответствует приведенный в табл. 1 набор отношений длины осциллятора к его толщине.

Таблица 1

Номер моды продольных колебаний	Номер моды колебаний изгиба				
	2	3	4	5	6
1	3,75	9,65	16,6	26,8	35,3
2	—	—	4,96	—	16,4

Отношения соответствуют экспериментальным данным для ПД с ротором из твердого сплава ВК-6 (угол контакта — 45°, сила прижима — 20 Н, ширина пьезоэлемента — 7,8 мм).

Обычно в осцилляторе возбуждают продольные колебания первой моды и колебания изгиба второй, третьей, четвертой или пятой мод. Точное определение размеров осциллятора производится экспериментально для данных материала и конструкции ротора, углов контакта и прижима, материала износостойкой прокладки. Длину осциллятора выбирают примерно на 10% большей расчетного значения; затем, постепенно уменьшая ее, определяют оптимальную длину по максимуму к. п. д.

9. ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ТОЧКИ

Можно предположить, что для двигателей с фрикционным контактом между статором и ротором идеальной траекторией движения контактной точки является треугольник или прямоугольник (рис. 10,*а*), по которому контактная точка в зоне зацепления движется с постоянной скоростью. Для резонансных систем такие траектории движения получить невозможно, однако к ним можно приблизиться, изменяя гармонические составляющие продольных и изгибных колебаний.

2*

Основные варианты траектории движения контактной точки для идеально жесткого ротора и угла контакта 45° приведены на рис. 10,*б* — *е*, причем варианты 10,*б* — *г* соответствуют равенству амплитуд продольных и изгибных колебаний (искажения траектории при соприкосновениях контактной точки с поверхностью ротора не показаны).

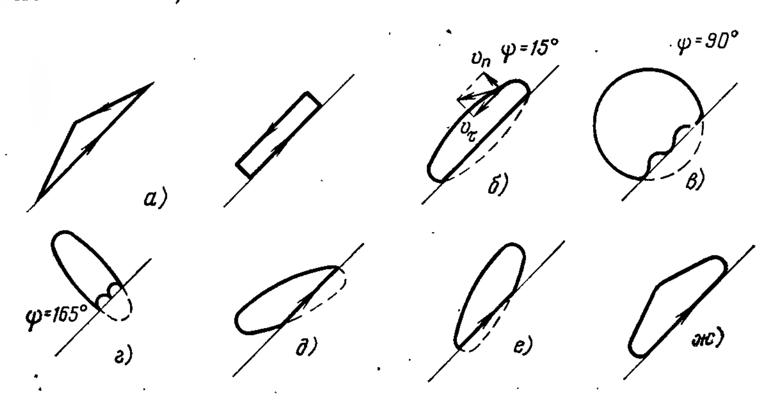


Рис. 10. Траектории движения контактной точки.

Скорость движения контактной точки по эллипсу непостоянна и уменьшается с увеличением кривизны траектории. Разложим вектор линейной скорости движения на нормальную v_n и тангенциальную v_τ составляющие (рис. 10,*б*). Очевидно, что тангенциальная составляющая является полезной. При больших значениях нормальной составляющей возможны отскоки конца осциллятора от поверхности ротора (рис. 10,*в*, *г*). Такой режим работы ПД может быть отнесен к виброударному [18, 19]; он сопровождается заметным износом контактной пары.

Скорость ротора постоянна и не может существенно измениться за время одного касания осциллятора. Поэтому непостоянство тангенциальной составляющей скорости движения контактной точки приводит к проскальзыванию, а следовательно, к потерям мощности и увеличению износа в зоне контакта. Таким образом, предпочтительны малые углы контакта (рис. 10,*б*); этот вывод тем более справедлив для реальных роторов, поскольку при больших значениях нормальной составляющей скорости в ротор ответвляется часть акустической энергии.

Траектории движения контактной точки при неравных амплитудах поперечной и продольной составляющих смещения показаны на рис. 10,*д*, *е*. Эти случаи соответствуют нулевой тангенциальной составляющей скорости на выходе и на входе в зону контакта и поэтому оптимальными считаться не могут.

Непостоянство тангенциальной составляющей скорости может быть уменьшено путем дополнительного возбуждения второй и третьей гармоник электрического сигнала (рис. 10,*ж*). Такой способ улучшения параметров ПД экспериментально проверялся авторами. При этом оказалось, что наблюдаемое небольшое увеличение мощности на валу двигателя не оправдывает затрат, связанных с усложнением схемы.

Исследования траектории движения контактной точки с применением современных методов визуального наблюдения процессов, в том числе голографических связаны с серьезными трудностями. Возникновение низкочастотных вибраций ПД, обусловленных неточностью изготовления ротора, приводит к размытию изображения и голограмм.

Первые удовлетворительные снимки траекторий движений точек в зоне контакта были сделаны В. С. Вишневским. Увеличение длины пьезоэлемента и диаметра ротора привело к увеличению амплитуды колебаний конца осциллятора до 30—50 мкм и снижению их частоты. При этом с помощью микроскопа МБС-1 отчетливо наблюдались траектории движения светящихся точек (граней кристаллитов), находящихся в непосредственной близости от контактной точки.

Фотографирование и визуальные наблюдения позволили определить зависимость угловой скорости вращения ротора ПД ω от формы траектории движения контактной точки. Зависимость ω от частоты питания f при постоянном напряжении питания U показана на рис. 11,*а*. Зависимость угловой скорости вращения от напряжения питания при заданной частоте представлена на рис. 12. На этих графиках изображены соответствующие траектории движения контактных точек. Траектории построены для взаимного расположения ротора и осциллятора, показанного на рис. 11,*б*.

Наблюдения за траекториями движения контактной точки подтвердили, что работа ПД основана на взаимодействии двух взаимно перпендикулярных колебаний осциллятора в точке контакта с ротором. Подтвердились

также предположения, касающиеся формы траектории движения. Дополнительное подтверждение описанного выше механизма работы двигателя было получено В. С. Вишневским при использовании износостойкой прокладки из проводящего материала. На специальной установке были сняты осциллограммы напряжения, приложенного к контакту этой прокладки с металлическим ротором.

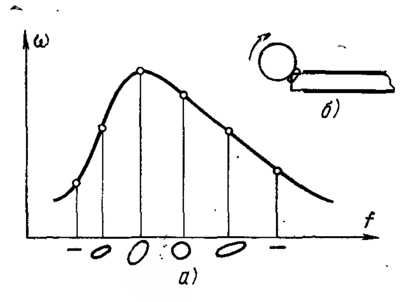


Рис. 11. Зависимость угловой скорости вращения ротора от частоты напряжения питания.

Рис. 12. Зависимость угловой скорости вращения ротора от напряжения питания.

Зависимости относительного времени контакта $\tau_к/T$ и частоты вращения двигателя n от напряжения питания U представлены на рис. 13,*а*. На рис. 13,*б*, *в* показаны зависимости тех же параметров от нагружающего момента на валу $M_н$ и силы прижима $F_п$. Из этих зависимостей следует, что удельные характеристики ПД выше в том случае, когда контактная точка движется по гистерезисной траектории, т. е. когда конец осциллятора при обратном движении отрывается от поверхности ротора. Однако вращение происходит и в случае, когда конец осциллятора при движении назад, не отрываясь, скользит по поверхности ротора, прижимаясь к нему с меньшей силой, чем при движении вперед. И в первом и во втором случаях проявляется гистерезис силы прижима в месте контакта, являющийся одним из обязательных условий вращения ротора. Вторым условием является скольжение или отсутствие контакта при обратном движении конца осциллятора.

Эти условия следует отличать от условия анизотропии трения, предполагающего различие в коэффициентах трения при движениях конца осциллятора вперед и

назад по поверхности ротора с одинаковыми силами прижима.

Из приведенных графиков следует, что для рассматриваемого двигателя время контакта, обеспечивающее максимальную частоту вращения, составляет примерно 0,7 периода колебаний T. В действительности это время, вероятно, несколько меньше, так как электрический кон-

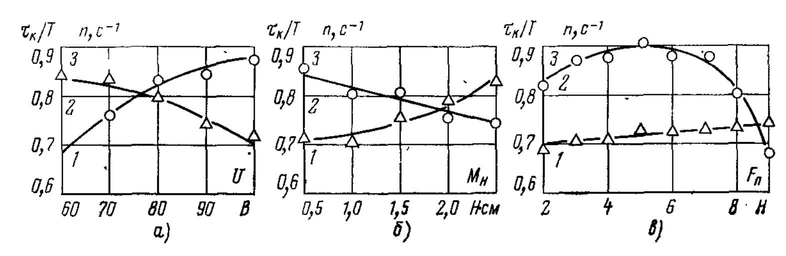


Рис. 13. Зависимости относительного времени контакта и частоты вращения ротора от напряжения питания, момента на валу и силы прижима.

Значения $\tau_к/T$ отмечены треугольниками; значения n — кружками; T — период колебаний.



такт должен наступать раньше, чем полный механический. Кроме того, реально контакт происходит не по линии, а по площади; поэтому одни точки раньше входят в контакт, а другие позже выходят из него.

Для ПД с мощностью на валу 3 Вт, работающего в режиме максимального к. п. д., при напряжении питания 200 В измеренное значение $\tau_к$ составило $0{,}45T$. Уменьшение отношения $\tau_к/T$ в силовом режиме работы двигателя, очевидно, связано с увеличением точности измерений при увеличении размаха колебаний контактной точки.

10. ЗАКЛИНИВАНИЕ. УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ПД

Предположим, что в зазор между пластиной и ротором вставлен клин (рис. 14,*а*). При вращении ротора по часовой стрелке клин втягивается в зазор; при этом сила трения между клином и ротором увеличивается. При вращении в противоположном направлении клин выталкивается из зазора и сила трения уменьшается. Аналогичный эффект наблюдается, если просто опереть пластину на ротор. Роль клина в этом случае играет часть материала в зоне контакта (рис. 14,*б*). Тот же эффект,

очевидно, должен иметь место и в случае, когда конец стержня перемещается по поверхности ротора. При движении вправо происходит заклинивание (рис. 14,*б*), при движении влево — расклинивание (рис. 14,*в*). В область контакта может втягиваться и материал ротора, что также приводит к увеличению силы трения в одном из направлений вращения ротора.

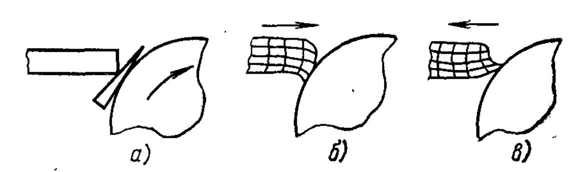


Рис. 14. Модели взаимодействия конца пластины с ротором.

Для оценки влияния заклинивания на характеристики двигателя были измерены коэффициенты заклинивания для различных материалов ротора. Коэффициент заклинивания определяется по формуле $N_з = M_1/M_2$, где M_1 и M_2 — моменты трогания ротора в прямом и обратном направлениях, причем всегда $M_1 > M_2$.

Оказалось, что коэффициенты заклинивания для различных фрикционных пар заметно различаются. Однако обнаружить прямую связь между коэффициентом заклинивания и параметрами двигателя не удалось. Причина заключается в том, что если при обратном движении конца осциллятора контакт нарушается, то заклинивание вносит дополнительное трение только при прямом движении. Можно предположить, что мощность на валу ПД должна зависеть от силы трения и в меньшей мере от коэффициента трения, который влияет лишь на силу прижима. Поэтому связь параметров двигателя с коэффициентом трения является косвенной — через силу прижима. От этой силы зависит поглощение акустической энергии ротором. Но указанное поглощение зависит от многих факторов, в том числе и от свойств материала ротора и его геометрии; поэтому заметить влияние заклинивания пока не удается.

Линейная скорость вращения ротора зависит от амплитуды и частоты смещения конца осциллятора. Следовательно, чем больше напряжение питания ПД, тем больше должна быть линейная скорость вращения ротора. Амплитуда смещения пропорциональна длине пьезоэлемента. Тем не менее, увеличивая эту длину, нельзя увеличить скорость двигателя, так как одновременно уменьшается частота колебаний осциллятора. Можно поэтому считать, что предельно допустимая частота вращения ПД не зависит от частоты возбуждения.

Максимальная амплитуда смещения ограничивается пределом прочности материала осциллятора или перегревом пьезоэлемента. Перегрев приводит к потере пьезоэлектрических свойств (тепловой деполяризации), которая происходит при определенной критической температуре, называемой температурой Кюри.

Для многих промышленных материалов температура Кюри превышает 250°С, поэтому максимальная амплитуда смещений преимущественно ограничивается пределом прочности материала. Для пьезокерамического материала ТБК-3 предельно допустимая линейная скорость $v_л$ составляет в лучшем случае 1,5 м/с, что соответствует напряжению в пьезоэлементе, примерно равному 1000 МПа. С учетом двукратного запаса по прочности $v_л = 0{,}75$ м/с.

Угловая скорость ротора определяется по формуле

$$\omega = 2v_л/D_р,$$

где $D_р$ — диаметр ротора.

Отсюда для частоты вращения (в мин$^{-1}$) имеем:

$$n = 60v_л/\pi D_р.$$

Если $D_р = 0{,}5 \div 5$ см, то $n \approx 3000 \div 300$ мин$^{-1}$. Таким образом, изменяя только диаметр ротора ПД, можно перекрыть широкую область частот вращения вала двигателя.

Уменьшение напряжения питания ПД позволяет снизить частоту вращения до 30 мин$^{-1}$ при сохранении достаточно высокой мощности на валу на единицу массы. Использование пьезоэлектрических материалов, армированных высокопрочными сапфировыми усами [20], даст возможность расширить диапазон частот вращения двигателя до 10 000 мин$^{-1}$.

Таким образом, в широкой области практического применения ПД могут обеспечить механический привод исполнительных элементов без использования редукторов. Для специальных устройств имеется возможность еще в больших пределах увеличивать диаметр ротора и за счет этого уменьшать частоту вращения (например, диаметр ротора ПД для проигрывателя может быть увеличен до 20 см).

11. КРЕПЛЕНИЕ И ПРИЖИМ ОСЦИЛЛЯТОРА

Для уменьшения потерь акустической энергии осциллятор двигателя должен быть надежно изолирован. В простейшем случае его следует упереть в звукоизоляционную прокладку *1* (рис. 15), выполняемую из резины или других материалов с низким удельным волновым сопротивлением. Закрепление конца осциллятора через прокладку будем называть торцевым; в отличие от консольного оно обеспечивает относительную свободу перемещения конца осциллятора в продольном и поперечном направлениях. Чем больше различие между волновыми сопротивлениями осциллятора и звукоизоляционной прокладки, тем большая часть падающей на прокладку акустической энергии отражается в осциллятор.

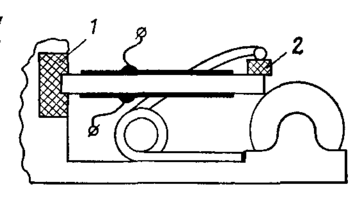
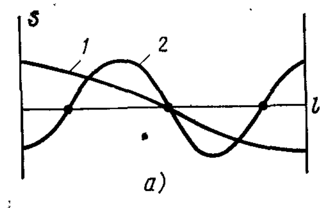


Рис. 15. Конструкция ПД.

Прижим осциллятора также целесообразно осуществлять через звукоизоляционную эластичную прокладку. Такая прокладка *2* уменьшает потери акустической энергии через основание двигателя. Крепление осциллятора в месте максимума смещения благодаря своей простоте используется наиболее часто. Тем не менее, потери энергии через звукоизоляционную прокладку довольно ощутимы и снижают к. п. д. двигателя в среднем на 15%.



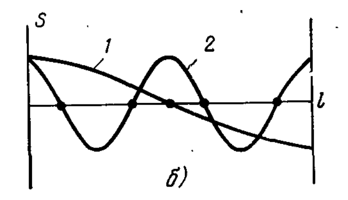


Рис. 16. Эпюры смещений для продольных (*1*) и изгибных (*2*) колебаний осциллятора второй (*а*) и третьей (*б*) мод.

Акустическая изоляция улучшается, если крепление осуществляется в месте минимума смещений. Для нахождения этого места строят эпюры смещений для продольных и изгибных колебаний. Для колебаний второй и третьей мод изгиба указанные эпюры приведены на рис. 16,*а*, *б*. Из рисунков следует, что для осцилляторов

с четной модой колебаний изгиба существует геометрическое место точек (линия в центре пластины), смещения которых равны нулю. Вдоль этой линии делают отверстие, в которое вставляют тонкий стальной стержень для крепления осциллятора (рис. 17,*а*).

Мономорфные осцилляторы проще закреплять в центрах (рис. 17,*б*). Для увеличения прочности осциллятора

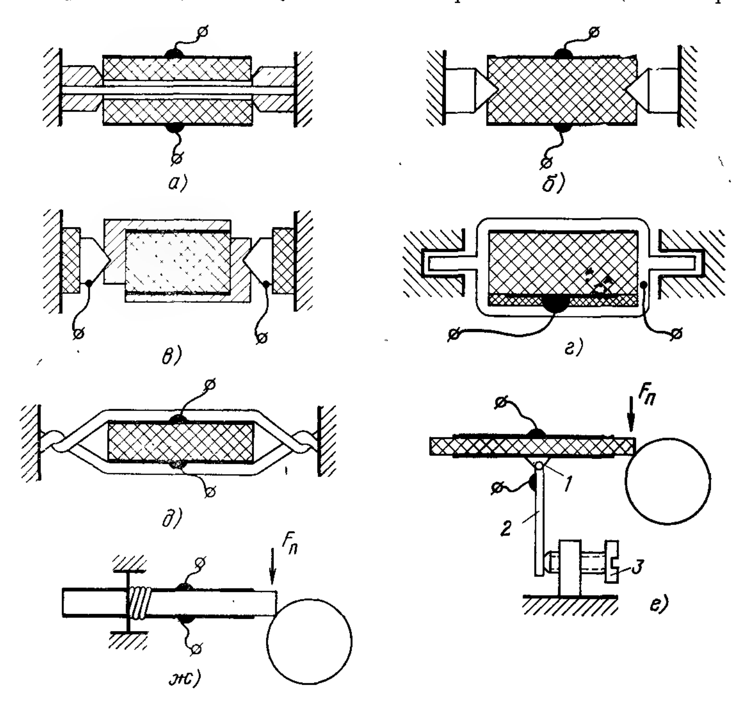


Рис. 17. Варианты закрепления осциллятора.

его снабжают стальными прокладками, обычно соединяемыми с электродами (рис. 17,*в*). Достаточно эффективным является крепление в рамке (рис. 17,*г*), которую приклеивают или припаивают к осциллятору. Рамку можно также использовать для подключения одного из электродов осциллятора.

В микроминиатюрных двигателях осциллятор закрепляют в резиновой или полиуретановой петле (рис. 17,*д*), а в двигателях часовых механизмов к осциллятору припаивают тонкий волосок *1* (рис. 17,*е*), уста-

новленный в подшипниках (на рисунке не показаны). Перпендикулярно ему припаивают тонкую плоскую пружину 2, которая упирается в винт 3, регулирующий силу прижима осциллятора.

Крепление в рамках используют и для осцилляторов с нечетной модой колебаний изгиба. В этом случае на осцилляторе делают бандаж из ниток, пропитанных эпоксидным клеем (рис. 17,*ж*). Размещая такую рамку ближе к линии минимума смещений продольных или изгибных колебаний, можно формировать необходимую траекторию движения точек в зоне контакта.

Кроме описанных устройств, для прижима осциллятора к ротору известно много других. В качестве силовых элементов используют плоские или витые пружины, а также резиновые и полиуретановые шнуры или прокладки (шнуры работают на растяжение, прокладки на сжатие). В двигателях, применяемых для транспортирования ленты, могут использоваться также силовые элементы в виде постоянных магнитов и электромагнитов. Часто в устройствах прижима используют гибкие передачи и рычаги. Выбор той или иной конструкции диктуется в основном рациональной компоновкой элементов двигателя.

В настоящее время наиболее широко используется прижим в непосредственной близости к линии контакта осциллятора с ротором, т. е. в месте максимальных смещений пьезоэлемента (рис. 18,*а*). На рис. 18,*б* показано прижимное устройство, исключающее потери акустической энергии на прижим. В этой конструкции осциллятор совершает продольные колебания второй моды и изгибные колебания четной моды.

Как показали исследования лабораторных образцов, на работу ПД оказывает влияние и конструкция выводов пьезоэлемента. Минимальное затухание вносят выводы в виде тонких проводников из медной или латунной проволоки диаметром 0,02—0,07 мм. Вывод пьезоэлемента является концентратором энергии акустических колебаний. Концентрация механических напряжений часто приводит к разрушению выводов, особенно при наличии в них дефектов. Для увеличения надежности выводов их скручивают в жгутики, состоящие из пяти и более жил. Для выводов используют также провод МГТФ. Фторопластовая изоляция таких проводов вносит затухание в резонатор, образованный выводом, и уменьшает тем самым механические напряжения в проводниках. Место спайки вывода с электродом целесообразно обволакивать звукопоглощающим материалом. Для этих целей удобно, например, использовать клей ПВА, каплю которого наносят на место соединения вывода с электродом. Для уменьшения затухания, вносимого выводом, его необходимо закреплять в месте минимума изгибных колебаний. Это позволяет уменьшить ответвление акустической энергии в вывод.

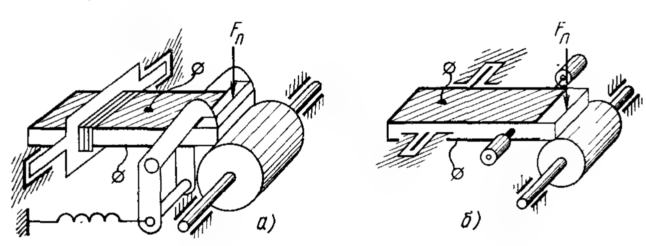


Рис. 18. Конструкции прижимых устройств.

Электроды можно подключать к источнику и с помощью контактов. Лучшие результаты были получены при использовании графитных контактов. Следует иметь в виду, что слой электрода в месте механического контакта под действием ультразвука разрушается. Поэтому при использовании прижимных контактов электрод в месте контакта должен быть утолщен, например, путем подпайки бронзовой пластинки. Контактный вывод удобно совмещать с элементом прижима, а также с местом закрепления осциллятора. Применение контактных выводов оправдано в тех случаях, когда требуется многократная замена отработавших осцилляторов.

12. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Частота вращения ротора, момент, мощность на валу, к. п. д. и масса являются основными параметрами электрических двигателей. Для ПД эти параметры зависят от конструкции двигателя, силы и угла прижима, угла контакта, от материала ротора и износостойкой прокладки, рабочей частоты. Отсюда следует сложность оценки того или иного варианта выполнения ПД. Такая оценка осложняется еще и потому, что существует уже более 50 принципиально различных конструкций ПД [12].

В связи с этим из всех параметров ПД необходимо было выделить основной для того, чтобы сузить область исследований, направленных на поиск лучших конструктивных вариантов. Таким параметром, по мнению авторов, является к. п. д. двигателя.

Действительно, скорость и момент вала ПД легко варьируются изменением диаметра ротора и зависят от мощности на валу, которая тем больше, чем больше к. п. д. Угол сдвига фаз всегда можно сделать равным нулю, если использовать компенсирующую индуктивность. Таким образом, к. п. д. двигателя является одним из наиболее важных параметров конструкции.

Для двигателей с торцевым закреплением осцилляторов были измерены максимальные значения к. п. д. при возбуждении колебаний второй, третьей и четвертой мод изгиба. При этом варьировались частота, момент и мощ-

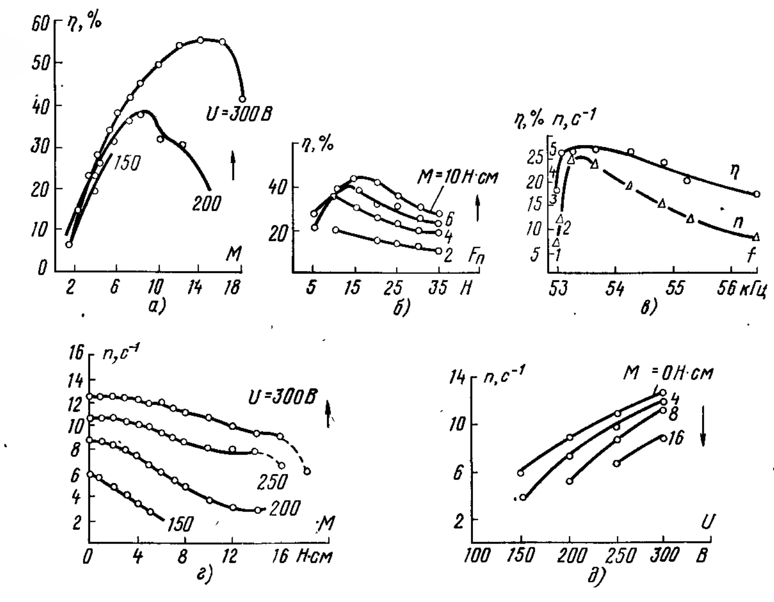


Рис. 19. Зависимости к. п. д. двигателя от момента на валу (в Н·см) силы прижима и частоты возбуждения; нагрузочные характеристики и характеристики управления.

ность на валу, угол и сила прижима, угол контакта. Оказалось, что во всех случаях при максимальных значениях к. п. д. угол контакта был равен 45±5° (измерения проводились для сплошного ротора, выполненного из твердого сплава ВК-6).

При изменении угла прижима в пределах от 60 до 120° ощутимых изменений параметров ПД не было обнаружено. Поэтому дальнейшие измерения проводились для угла контакта 45° и угла прижима 90°. Зависимости к. п. д. η от момента на валу M, силы прижима $F_п$ и час-

тоты возбуждения f, а также зависимости частоты вращения n от момента на валу M и напряжения возбуждения U для двигателя с возбуждением третьей моды колебаний изгиба показаны на рис. 19.

Максимальный к. п. д. двигателя зависит от материала, из которого выполнен пьезоэлемент. Для ПД, пьезоэлемент которого изготовлен из пьезокерамического материала ПКР-10[1], получен рекордный до настоящего

Таблица 2

Некоторые характеристики отечественных пьезоматериалов

Материал	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	tg δ, %: в слабых полях	tg δ, %: при E= =3 кВ/см	Температура Кюри, °С	k_p	Добротность Q_M	Скорость звука c, м/с	Плотность ρ, т/м³
ТБК-3	1200	2,0	4	105	0,25	300	4700	3,5
НБС-3	1800	2,5	—	270	0,2	300	4000	5,5
ЦТС-19	1500	3,5	—	290	0,4	50	3300	7,0
ЦТС-23	1050	0,75	4	280	0,43	200	3200	7,4
ЦТСНВ-1	2050	—	2	—	0,45	70	2900	7,3
ЦТБС-3	2400	1,5	3,5	453	0,45	200	3600	7,1
ЦТСС-1	1000	0,8	1,5	548	0,43	500	3500	7,3
ПКД-124Т	970	0,5	1,5	300	0,52	1200	—	7,5
ПКД-501	1800	0,5	—	—	0,6	500	—	7,5
ПКР-5	350	0,27	—	325	0,46	2400	3800	7,7
ПКР-6	2400	0,4	1,8	234	0,64	1100	3200	8,2
ПКР-8	1450	0,35	0,9	320	0,59	2100	3300	7,7
ПКР-10	380	0,3	0,9	297	0,48	2800	3300	8,0
ПКР-12	1800	0,37	2,0	220	0,64	1500	3200	8,0

Примечание. ε_{33}^T — диэлектрическая постоянная при приложении поля в направлении поляризации и постоянстве механического напряжения T; ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; k_p — радиальный коэффициент электромеханической связи.

времени к. п. д., равный 85%. Высокие удельные характеристики имеют также ПД с пьезоэлементами из материала ПКД-124Т. Некоторые характеристики ряда отечественных пьезоматериалов приведены в табл. 2 [21—23].

Одним из основных требований, предъявляемых к материалу пьезоэлемента ПД, является его максимальная динамическая прочность, поскольку пьезоэлементы работают при больших механических напряжениях. Кроме

[1] Этот материал получен в Ростовском государственном университете.

того, необходимо, чтобы у пьезоматериала были высокая механическая и электрическая добротность при работе в режимах, предельно допустимых по мощности.

13. ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПРОКЛАДКИ. РЕСУРС ПД

Ресурс двигателя зависит от конструкции (рис. 20,*а* — *м*) и материала износостойкой прокладки. Обычно площадь контактирующей поверхности ротора в десятки и сотни раз превосходит площадь контактирующей поверхности прокладки. Поэтому износ ротора, особенно выполненного из сверхтвердых материалов, пренебрежимо

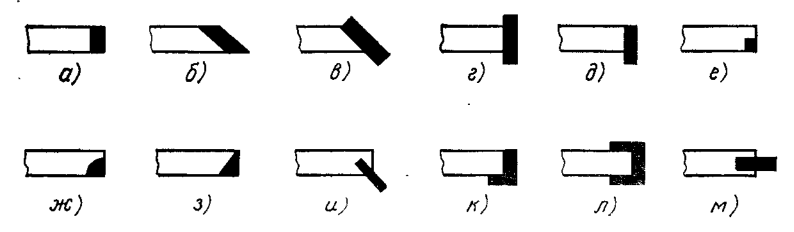


Рис. 20. **Варианты выполнения износостойких прокладок.**

мал. Например, для ротора из твердого сплава ВК-6 диаметром 20 мм за 2000 ч работы ПД произошел износ на глубину всего лишь 10 мкм, что соответствует увеличению угловой скорости на 0,05%. Износостойкая невыступающая (рис. 20,*а*) прокладка толщиной 0,7 мм за это же время износилась полностью.

Для уменьшения износа невыступающей прокладки делались попытки изготовлять ротор из материалов, обладающих существенно меньшей твердостью (эбонита, карболита, органического стекла, дерева и других). Однако это приводило к заметному ухудшению характеристик ПД. Двигатель плохо запускался, и осциллятор подобно инструменту ультразвукового станка, вырабатывал рытвины на поверхности неподвижного ротора; при этом к. п. д. двигателя снижался до 10%.

В. Б. Луизинов и И. А. Слуцкий [24] предложили изготовлять износостойкие невыступающие прокладки (рис. 20,*е*) из пластических материалов (текстолита, карболита, прессованной древесины). Применение органических материалов для изготовления невыступающих прокладок или роторов оправдано для ПД мощностью менее 1 Вт. В тех случаях, когда требуется получить

большой ресурс двигателя и большие удельные мощности, для невыступающих прокладок используются твердые и сверхтвердые неорганические материалы, такие как алмаз, эльбор, рубин, сапфир, поликор, алунд, материалы на основе карбида титана, вольфрама, хрома, нитрида бора, кремния и др.

Различные варианты выполнения износостойких прокладок и их крепления на конце осциллятора показаны на рис. 20. Наиболее технологичные варианты крепления невыступающей прокладки показаны на рис. 20,*а*, *б*. Для значительного увеличения ресурса двигателя авторами были предложены конструкции выступающих прокладок (рис. 20,*в* — *д*, *и*, *м*). Эти прокладки могут выполняться как из пластических материалов, так и из твердых износостойких металлов и керамик.

Остальные варианты (рис. 20,*ж*, *з*, *к*, *л*) применяют преимущественно при необходимости увеличения поверхности в месте склейки. Прокладки с выступающей частью используют также в реверсивных ПД.

При работе двигателя в зоне контакта концентрируется значительная энергия. Часть этой энергии в момент проскальзывания прокладки по ротору превращается в тепло. При этом температура в зоне контакта может превышать 500°С. При использовании, например, стальных роторов происходит непрерывное сгорание поверхности ротора с обильным выделением окиси железа в виде мелкодисперсного порошка. Следовательно, материалы прокладки и ротора должны быть достаточно термостойкими и стойкими к окислению.

Испытания ПД на ресурс показали, что время наработки зависит от мощности на валу, приходящейся на единицу длины контактирующей поверхности осциллятора. Представить эту зависимость в виде графика пока невозможно, так как отсутствуют статистические данные по испытаниям на ресурс опытной партии, состоящей хотя бы из нескольких десятков двигателей.

Оказалось, что износ связан с нарушением нормальной работы ПД из-за искажения траектории точки контакта. Несмотря на то, что сделаны только первые шаги по изучению износа контактирующих поверхностей ПД, полученные результаты уже сейчас позволяют обеспечить время наработки не менее 2000 ч для двигателей мощностью до 2 Вт и десятки тысяч часов для двигателей мощностью до 0,01 Вт.

Глава вторая

ВЛИЯНИЕ СОПУТСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

14. КОЛЕБАНИЯ ИЗГИБА ПО ШИРИНЕ ОСЦИЛЛЯТОРА. КОНТАКТНОЕ ПЯТНО

В течение периода колебаний линия контакта осциллятора с ротором перемещается по некоторой поверхности, которую назовем поверхностью сопряжения. До сих пор предполагалось, что эта поверхность является цилиндрической (рис. 21,*а*). Практически поверхность сопряжения может отличаться от цилиндрической, что сопровождается изменением линейной скорости точек образующей как по величине (рис. 21,*б*), так и по направлению (рис. 21,*в*). В результате зона контакта уменьшается и появляется проскальзывание между точками, скорости которых не равны линейной скорости ротора. Этот нежелательный эффект вызывает заметное снижение к. п. д. двигателя и появление скрипа.

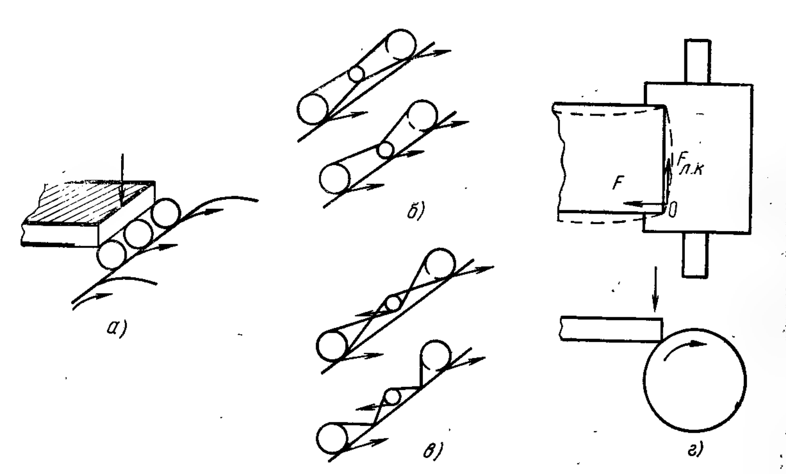


Рис. 21. Траектории движения контактных точек.

Основной причиной искривления контактной линии является возбуждение паразитных механических колебаний. Наиболее часто возбуждаются колебания изгиба по ширине пластины. Они порождаются полезными колебаниями изгиба по длине осциллятора и обусловлены пауссоновскими связями. Если колебания по ширине осциллятора не являются резонансными, то практически ими можно пренебречь. Поэтому, проектируя ПД, стремятся разнести резонансы изгибных колебаний по длине и резонансы колебаний по ширине. Это достигается двумя путями: либо резонанс колебаний по ширине смещают в область высоких частот, уменьшая ширину осциллятора, либо, наоборот, увеличивают ширину осциллятора та́к, чтобы рабочая частота двигателя совпадала с частотами антирезонанса изгибных колебаний по ширине. Это совпадение имеет место в случае, когда по ширине пластины укладывается четное число полуволн изгибных колебаний.

Ранее предполагалось, что фрикционное взаимодействие осциллятора с ротором происходит по всей зоне контакта. Практически контакт часто наблюдается в одном или нескольких пятнах; поверхность этих пятен и их расположение изменяются во времени. Флуктуации контактного пятна происходят по мере износа материалов в зоне контакта, а также вследствие люфтов осциллятора и ротора. Стабилизация контактного пятна обеспечивается при тщательном изготовлении ротора. Биение ротора и его конусность не должны превышать нескольких микрометров. С такой же точностью должно осуществляться крепление осциллятора и ротора. Невыполнение этих условий приводит к колебаниям угловой скорости вращения, амплитуда которых может достигать 5% средней скорости.

Рассмотрим влияние смещения контактного пятна на работу ПД. Наиболее неблагоприятным является случай, когда контактное пятно находится вблизи одной из боковых поверхностей осциллятора (рис. 21,*г*). Переменная сила F, которая возникает в этом случае при взаимодействии осциллятора с ротором, вызывает колебания сдвига и колебания изгиба по ширине осциллятора. При совпадении рабочей частоты двигателя с собственной частотой колебаний сдвига или изгиба по ширине осциллятора контактные точки начинают двигаться по замкнутой траектории, которая расположена в плоскости осциллятора. В результате появляется постоянная составляющая силы $F_{л.к}$, направленная вдоль линии контакта. Эта сила смещает осциллятор в пределах люфта, а, следовательно, происходит перемещение контактного пятна вдоль линии контакта. Изменение силы $F_{л.к}$ приводит к непрерывным колебаниям осциллятора с частотой, близкой к частоте вращения ротора. Потери энергии на паразитные смещения осциллятора вдоль оси ротора вызывают изменения частоты вращения и способствуют появлению скрипа.

Таким образом, при расчете осциллятора следует обеспечить достаточное удаление частот резонансов колебаний изгиба и сдвига от рабочей частоты двигателя.

15. ПАРАЗИТНЫЕ МОДЫ КОЛЕБАНИЙ РОТОРА

В момент соприкосновения осциллятора с ротором часть акустической энергии проникает в ротор в виде упругих объемных и поверхностных волн. Так как воз-

мущение ротора имеет продольную и поперечную составляющие, то в нем могут возбудиться колебания практически всех типов (радиальные, продольные вдоль образующей, изгибные вдоль оболочки и образующей, поверхностные и т. д.). В сплошных металлических роторах колебания, многократно отражаясь от границ ротора, могут привести к образованию стоячих волн. Эти волны оказывают влияние на траектории движения контакных точек. Можно предположить, что при некоторых фазовых соотношениях стоячие волны будут способствовать улучшению параметров ПД. Для реализации такой возможности потребовался бы точный учет амплитуд и фазовых соотношений колебаний всех типов, стабильность которых при воздействии всех дестабилизирующих факторов практически невозможно обеспечить. Поэтому упругие колебания в роторе во всех случаях следует считать вредными. Для их устранения можно, например, уменьшить диаметр и длину ротора, в результате чего его собственные частоты окажутся выше рабочей частоты ПД. Этот способ, применяемый только для высокоскоростных двигателей, не гарантирует полного устранения паразитной реакции ротора, поскольку вместо радиальных колебаний могут появиться колебания изгиба, крутильные и продольные колебания по длине вала.

Более надежный эффект получается при уменьшении добротности материала ротора. Это достигается при использовании пористых неорганических или композиционных материалов, в том числе и материалов, поры которых заполнены органическими составами. Применение роторов из органических материалов практически устраняет реакцию ротора, однако при этом значительно ухудшаются параметры двигателя.

Ротор часто выполняют составным: вал — слой звукопоглотителя — полый цилиндр из сверхтвердого материала. Такая конструкция частично демпфирует радиальные колебания и колебания вдоль образующей цилиндра. Полностью исключается влияние вала на колебания ротора. Однако в таком роторе наблюдаются значительные продольные колебания и колебания изгиба по окружности цилиндрической оболочки. Для полного демпфирования этих колебаний цилиндрическую оболочку выполняют тонкостенной (толщиной 0,2—0,5 мм). Двигатели с такими роторами работают практически бесшумно, однако их к. п. д. и мощность значительно ниже, чем двигателей со сплошными или толстостенными роторами, и близки к соответствующим характеристикам ПД с пластмассовыми роторами.

16. АКУСТИЧЕСКИЕ ШУМЫ ПД

Задача создания мощных пьезоэлектрических двигателей с высоким к. п. д., бесшумно работающих на любых частотах в области резонанса, остается нерешенной. Поэтому в большинстве случаев приходится проектировать такие двигатели со строго заданным интервалом рабочих частот (в пределах 0,5—1%), исключая тем самым возможность управления параметрами ПД путем изменения рабочей частоты.

Шумы двигателя могут представлять собой слабое шипение, уровень которого не превышает уровня шумов двигателей с подшипниками скольжения. Эти шумы обусловлены сухим трением в месте контакта ротора с осциллятором; они сильно зависят от выбора фрикционной пары и практически отсутствуют, если один из узлов пары изготовлен из пластического материала. Жидкая или твердая смазка также устраняет шумы, однако при этом заметно уменьшаются к. п. д. и момент на валу.

Шумы второго типа — скрипы, которые в отличие от шипения создают неприятные ощущения и практически исключают применение ПД в помещениях, где находятся люди. Снижение уровня этих шумов является одной из основных целей работ по пьезоэлектрическим двигателям.

Авторами совместно с А. А. Презом [25] исследован частотный спектр скрипов. Измерения показали, что спектр состоит из дискретных частот, которые совпадают с резонансными частотами, расположенными в звуковом диапазоне. Эти частоты соответствуют преимущественно модам колебаний изгиба.

Более детальные исследования скрипов были выполнены с помощью датчиков колебаний изгиба, наклеенных на осциллятор. Они позволили обнаружить также и гармоники с частотами, равными резонансным частотам осциллятора и превышающими верхнюю границу звукового диапазона. Некоторые из этих частот оказались выше рабочей частоты ПД. Для осцилляторов с оптимально выбранными размерами колебания на всех указанных частотах отсутствуют и скрипы не прослушиваются.

Среди паразитных колебаний были обнаружены и субгармоники, частоты которых кратны рабочей частоте двигателя.

Рассмотрим теперь механизмы возбуждения скрипа. Первый механизм связан с параметрическим возбуждением субгармоник. Известны два способа понижения частоты сигнала. При первом способе сигнал сначала выпрямляется, а затем преобразуется в сигнал любой частоты. При втором способе преобразование осуществляется за счет параметрического эффекта. Вращение ротора свидетельствует о выпрямительных свойствах фрикционного контакта в ПД. Это вращение при определенных условиях может возбуждать продольные и изгибные колебания осциллятора со сравнительно низкими частотами. Преобразование вращения в паразитные колебания осциллятора происходит аналогично преобразованию колебаний осциллятора во вращение ротора. На определенной частоте продольные и изгибные колебания осциллятора резонируют и оказываются сдвинутыми по фазе таким образом, что конец осциллятора перемещается по эллиптической траектории.

Второй механизм возбуждения скрипов связан с эффектом заклинивания. При вращении ротора происходит сжатие осциллятора до определенного порогового размера, при котором разрушается контактирующая поверхность. В течение очень короткого времени трение оказывается равным нулю, затем осциллятор, расширяясь, возвращается в исходное состояние. Такое периодическое заклинивание осциллятора и является причиной скрипа.

Рассмотрим механизм параметрического возбуждения субгармоник. Как известно [26], изменение массы или жесткости колебательной системы при определенных условиях может привести к параметрическому возбуждению субгармонических частот, кратных частоте изменения параметра. Возможны различные варианты параметрического возбуждения субгармоник в ПД. Предположим, что в момент возбуждения скрипов большая ось траектории точки контакта (эллипса) составляет с касательной к ротору угол, примерно равный 90°. При такой траектории конец пьезоэлемента, соприкасаясь с ротором, оказывается на некоторое время зажатым. Но осциллятор, зажатый на одном конце, имеет более низкие резонансные частоты, чем в свободном состоянии. Следовательно, можно считать, что при зажиме осциллятора в его механическую систему вносится дополнительная масса, возрастающая по мере увеличения площади контакта осциллятора с ротором. При совпадении резонансных частот зажатого осциллятора с частотами, кратными рабочей частоте ПД, и достаточном уровне возбуждения возникают скрипы.

В пользу этого механизма возбуждения скрипов свидетельствует описанный ниже эксперимент. Консольно закрепленный осциллятор с собственной частотой, равной нескольким герцам, с помощью пьезоэлемента возбуждался на частоте, которая в 2 раза превышала собственную частоту осциллятора с двумя зажатыми концами. Колебания осциллятора измерялись при помощи пьезодатчика. До тех пор пока конец пьезоэлемента был свободен, субгармонические колебания отсутствовали. Когда же к колеблющемуся концу пьезоэлемента была придвинута опора, которая кратковременно защемляла его свободный конец, пьезодатчик фиксировал субгармонические колебания.

Изучение механизма возбуждения акустических шумов в ПД позволило сделать следующие практические выводы. Для устранения скрипа при конструировании ПД следует придерживаться следующих правил. Согласованные размеры пьезоэлемента следует выбирать так, чтобы двигатель работал на возможно меньшей моде изгибных колебаний. Резонансные частоты пьезоэлемента по его ширине и толщине должны быть возможно дальше от рабочей частоты ПД. Крепление пьезоэлемента должно вносить минимальное затухание на рабочих модах колебаний и максимальное на более низкочастотных модах. Материал пьезоэлемента должен быть однородным. Ширина контактной площадки должна быть минимальной. Практически эта ширина для частот 20—200 кГц лежит в пределах 0,05—0,5 мм.

17. МАТЕРИАЛ РОТОРА. ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПД

Для того чтобы определить влияние материала ротора на характеристики ПД, были исследованы двигатели с роторами, выполненными из различных материалов. Для изготовления роторов применялись материалы на основе карбида титана, вольфрама, хрома, нитрид кремния, бора, сталь, чугун, бронза, латунь различных марок, сплавы алюминия, титана. Испытывались роторы из кремния, рубина, кварца, стекла, ситалла, керамики 22-ХС, пьезокерамики, ферритов, а также роторы из пластических материалов текстолита, эбонита, карболита, оргстекла, из резины, полиуретана, твердых пород дерева. При исследованиях применялся осциллятор с износостойкой прокладкой из керамики 22-ХС; размеры осциллятора были выбраны исходя из условий его работы с ротором из материала ВК-8.

При испытаниях нового ротора чистота его поверхности постепенно изменяется до определенного стабильного состояния. Поэтому характеристики измерялись после такой стабилизации. Основные результаты измерений приведены в табл. 3.

Эти результаты, а также другие данные, полученные для различных сил прижима, так и не позволили окончательно связать основные параметры двигателя с физическими свойствами, по крайней мере, неорганических материалов. Так, например, ожидалось, что будет выяв-

лена зависимость параметров ПД от коэффициента трения. Однако малое значение коэффициента трения компенсируется увеличением силы прижима, что лишь незначительно увеличивает потери в элементах крепления и прижима. Не обнаружена явная зависимость параметров ПД и от волнового сопротивления материала. Все испытанные неорганические материалы обеспечивали значительное отражение акустической энергии от поверхности ротора.

Таблица 3

Влияние материала ротора на характеристики ПД

Материал	Момент на валу M, Н·см	Потребляемый ток I, мА	Сдвиг фаз между током и напряжением, град	Частота возбуждения f, кГц	Мощность на валу $P_н$, Вт	К. п. д. η, %
Сталь ХВГ (HRC-65)	5,7	52	—49	53,60	1,76	25,8
Сталь 45	8,8	55	—41	53,50	2,73	32,9
Сталь хромистаи	2,0	36	—40	54,00	0,62	8,6
Чугун № 1	9,3	54	—2	52,58	2,88	26,8
„ № 2	9,7	60	—20	52,44	3,01	26,7
„ № 3	10,0	67	—7	52,51	3,09	23,3
Бронза	2,5	30	20	53,42	0,77	13,6
Медь	4,0	37	0	53,61	1,24	16,7
Кремний	6,7	60	0	52,70	2,08	17,3
Текстолит с твердосплавной оболочкой (2 мм)	6,4	50	—15	53,10	1,99	20,6
То же 0,4 мм	1,0	20	—50	54,10	—	—
Свинец с твердосплавной оболочкой (0,4 мм)	0,7	30	—23	53,1	0,25	4,5
Оргстекло	0,3	65	40	51,00	—	—
Твердый сплав Т5К10	4,7	60	—64	52,69	1,46	27,8
Т15К6	7,0	70	—66	52,00	2,17	38,1
ВК-6	6,4	64	—64	52,3	1,98	35,3
ВК-8	5,6	60	—65	52,7	1,74	34,2
ВК-15	4,5	63	—70	52,48	1,4	32,4

Примечание. Испытания проводились для роторов диаметром 20 мм при напряжении возбуждения двигателя 200 В, силе прижима 2) Н, частоте вращения 5 $с^{-1}$.

Следует отметить, что роторы из пластических материалов, из свинца, олова, алюминия, так же как роторы с тонкостенными оболочками, обеспечивали меньший крутящий момент на валу и соответственно меньшие мощность и к. п. д. Однако частота вращения ротора оставалась достаточно высокой.

Предельное значение частоты вращения в последнем случае достигается при низком напряжении питания, а регулирование ее с помощью напряжения затруднено. Эти результаты можно объяснить низким значением предела прочности указанных материалов. Низкая прочность приводит к тому, что при зацеплении конца осциллятора с ротором поверхностный слой разрушается; это сопровождается скольжением конца осциллятора по поверхности ротора. Так как сила трения мало зависит от скорости, то при работе ПД в режиме скольжения частота вращения ротора практически не зависит от напряжения питания.

Следует отметить, что материалы с низкой прочностью (алюминий, медь, их сплавы) заметно осыпаются при работе ПД и поэтому могут быть использованы только для изготовления роторов маломощных двигателей или двигателей с органическими износостойкими прокладками. Наоборот, сверхтвердые материалы (ВК-6, ВК-8 и материалы на основе карбида хрома, карбида титана, нитрида кремния, нитрида бора) целесообразно использовать для ПД широкого класса особенно для мощных и высокоскоростных двигателей.

Роторы, выполненные из сверхтвердых материалов с большой абразивностью, например из алунда, сильно изнашивают прокладки, заметно снижая ресурс двигателя. При изготовлении роторов из стали ХВГ наблюдалось неравномерное окисление поверхности при работе в силовых режимах. Образующиеся окислы сильно изнашивают прокладку и вызывают колебания частоты вращения. Поэтому целесообразно изготовлять ротор из нержавеющей стали. Стальные и чугунные роторы могут быть рекомендованы для дешевых маломощных двигателей (до 1 Вт), от которых не требуется стабильность частоты вращения.

При исследовании роторов, изготовленных из различных материалов, было обнаружено, что рабочая частота для каждого данного ротора и осциллятора имеет определенное значение. Авторами были измерены резонансные частоты для различных материалов роторов при низких уровнях возбуждения осциллятора, когда ротор не вращается. Значения резонансных частот приведены в табл. 3.

Сравнение полученных данных между собой, а также с частотой резонанса продольных колебаний свободного

осциллятора показывает, что каждый материал ротора вносит свою реактивность в резонансную систему пьезоэлемента. В результате повышается жесткость системы и частота резонанса увеличивается по сравнению с частотой свободного осциллятора.

Так как реактивность вносится ротором в момент его соприкосновения с осциллятором, параметры резонасного контура изменяются с частотой колебаний. Этого изменения может быть достаточно для того, чтобы при больших уровнях возбуждения система параметрически возбудилась на одной из субгармонических частот. При рассмотрении параметрического возбуждения необходимо также учитывать, что параметры резонансной цепи могут изменяться под действием постоянной сжимающей осциллятор силы, которая действует в нагруженном режиме и представляет собой реакцию ротора.

Увеличение жесткости пьезоэлемента, обусловленное ротором, зависит от положения и размеров контактного пятна. Для неточно изготовленного ротора контактное пятно может изменяться в заметных пределах; в результате входное сопротивление ПД также не остается постоянным. Нестабильность входного сопротивления является существенным недостатком двигателя, осложняющим включение ПД в цепи обратной связи преобразователей, работающих в автогенераторном режиме. Изменение сопротивления в таких схемах приводит к колебаниям частоты, которая может выходить за пределы области частот бесшумной работы двигателя. Появление скрипа вызывает еще большие скачки сопротивления, так как контактное пятно может отсутствовать в течение примерно половины периода субгармоники. Для устранения описанных явлений приходится применять в источнике питания ПД задающий генератор без электромеханической обратной связи.

Колебания сопротивления могут быть ослаблены в результате подбора материалов ротора, вызывающих минимальный сдвиг частоты резонанса. Для этих материалов, к которым относится, например, твердый сплав Т15К6, расширяется диапазон частот бесшумной работы ПД.

Глава третья

КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

18. НЕРЕВЕРСИВНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДЕФОРМАЦИЙ СЖАТИЯ, РАСТЯЖЕНИЯ И ИЗГИБА

Все ПД можно классифицировать следующим образом: нереверсивные и реверсивные (НПД и РПД); с пьезоэлектрически пассивным ротором и активным статором, с пьезоэлектрически активным ротором и пассивным статором, с электрическим возбуждением колебаний одного типа и двух типов.

В двигателях могут быть возбуждены колебания сжатия — растяжения, изгиба, сдвига, крутильные и радиальные колебания. Сочетания этих колебаний по два приводят к большому числу существенно различных конструкций ПД. Кроме того, все эти колебания могут возбуждаться по различным направлениям осциллятора, например возможны колебания сдвига по толщине, ширине, длине. Описать подробно все конструкции ПД здесь не представляется возможным, тем более что многие из них еще недостаточно изучены. Поэтому в дальнейшем попытаемся сформулировать только общие принципы построения конструкций, придерживаясь деления ПД на три класса: с пассивным ротором, с пассивным статором и активными ротором и статором.

Ранее рассмотренный двигатель (см. рис. 9,*а*) относится к НПД, так как его реверс невозможен (или неэффективен) ни при коммутации электродов, ни при изменении частоты питающего напряжения. В этой конструкции электрически возбуждаются только продольные колебания по длине пластины; поперечные (изгибные) колебания возбуждаются при взаимодействии осциллятора с ротором.

Конструкция двигателя существенно не изменится, если ось ротора расположить параллельно пластине (рис. 22,*а*). При этом рабочую частоту ПД выбирают примерно равной частоте резонанса упругих колебаний по ширине пластины. В таком случае значительно увеличиваются площадь механического контакта осциллятора с ротором и мощность на валу двигателя. Резонансные колебания можно возбудить и по толщине пластины. Од-

нако этот случай встречается редко и практического интереса не представляет.

Мощность ПД на данной частоте можно увеличить, повышая номер моды упругих колебаний. Для этого пьезоэлемент делят на зоны с одинаковыми значениями механических напряжений. Эти зоны выделяют либо электродами (рис. 22,*б*), либо направлением поляриза-

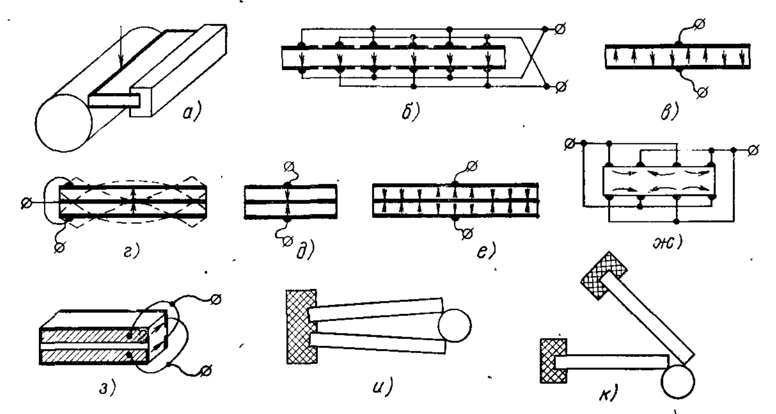


Рис. 22. Конструкции НПД.

ции зон (рис. 22,*в*). Известны также конструкции НПД, в которых электрически возбуждаются колебания изгиба, а продольные колебания генерируются механически. Колебания изгиба можно возбуждать несколькими способами, схематически показанными на рис. 22,*г* — *з*.

В дальнейшем деформациями «чистого» изгиба будем называть электрически возбуждаемые деформации изгиба, не сопровождающиеся сжатием — растяжением. При «чистом» изгибе по толщине имеется слой, площадь которого при деформации пластины остается неизменной. Части, расположенные по обе стороны от этого слоя, обладают одинаковой пьезоактивностью, т. е. при приложении электрического поля на их концах развиваются силы, одинаковые по величине и противоположные по направлению. Неоднородность материалов пьезоэлементов по пьезоэлектрическим или упругим свойствам, различие толщин или площадей электродов приводят к тому, что вместе с деформациями изгиба возбуждаются деформации сжатия — растяжения, которые, складываясь с механически возбуждаемыми продольными деформациями, могут существенно ухудшить параметры НПД. Параметры двигателя с электрическим возбуждением продольных колебаний могут существенно ухудшиться из-за колебаний изгиба, обусловленных, например, неоднородностью материала.

Для совмещения изгибного и продольного резонансов номер моды колебаний изгиба должен быть выше номера моды продольных колебаний. Для этого пьезоэлемент разделяют на зоны, число которых должно быть равно номеру моды изгибных колебаний. Зоны выделяют направлением поляризации (рис. 22,*е*) или электродами (рис. 22,*ж*, *з*). В каждой зоне механические напряжения имеют одинаковые направления.

Нереверсивные ПД с электрическим возбуждением колебаний изгиба по своим параметрам уступают НПД с электрическим возбуждением колебаний сжатия — растяжения; их осцилляторы являются более сложными по конструкции, а роторы вращаются в противоположном направлении. При выключении напряжения осциллятор НПД с электрическим возбуждением колебаний изгиба оказывается расклиненным, что позволяет возвратной пружине вернуть ротор в исходное положение. Наоборот, в двигателе с электрическим возбуждением продольных колебаний осциллятор в выключенном состоянии заклинивает ротор.

Совместное включение двух осцилляторов с возбуждением колебаний различных типов (рис. 22,*и*) позволяет почти вдвое увеличить мощность высокоскоростных НПД без увеличения габаритов (для сравнения на рис. 22,*к* показан НПД с осцилляторами одинакового типа).

19. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ С ПАССИВНЫМ РОТОРОМ И ВОЗБУЖДЕНИЕМ КОЛЕБАНИЙ СДВИГА

Нереверсивный пьезоэлектрический двигатель с возбуждением колебаний сдвига отличается от двигателя с возбуждением продольных колебаний только поляризацией пьезоэлемента (рис. 23,*а*) [12]. В пьезоэлементе с поперечной по отношению к направлению приложенного электрического поля поляризацией возбуждаются одновременно колебания сдвига, как по толщине (рис. 23,*б*), так и по длине (рис. 23,*в*). На резонансных частотах эти колебания легко разделяются. Обычно резонанс колебаний по длине (когда $l>2a$) мало заметен.

Резонанс сдвига по толщине пьезоэлемента отличается низким входным сопротивлением, равным нескольким омам и даже десятым долям ома. Это связано с тем, что указанный резонанс наблюдается на сравнительно высоких частотах (сотни килогерц). Эффективность электромеханического преобразования определяется коэффициентом электромеханической связи сдвиговых колебаний, который для некоторых материалов достигает 0,7.

Создание НПД с возбуждением колебаний сдвига по толщине позволяет значительно повысить рабочую частоту двигателя — до 500 кГц. В результате расширяется область частот бесшумной работы и значительно снижается необходимое напряжение питания. В настоящее время изготовлены макеты, подтверждающие работоспособность таких двигателей, однако их параметры пока еще далеки от желаемых.

Исследования НПД с возбуждением колебаний сдвига (поперечных колебаний) обнаружили сложность процессов формирования траектории движения контактной точки. Оказалось, что колебания сдвига по толщине генерируют как изгибные по толщине, так и продольные по длине колебания. Подключение ротора и его нагружение (вплоть до зажатия) мало влияют на входное сопротивление осциллятора. Этим объясняется низкий к. п. д. двигателя с возбуждением колебаний сдвига (примерно 10%). Дело в том, что ротор незначительно нагружает осциллятор и почти вся введенная в резонатор энергия рассеивается на его внутреннем сопротивлении.

Использование колебаний сдвига по толщине пьезоэлектрической оболочки (рис. 23,*г*) позволяет создать ПД с пассивным ротором, в котором контакт между ротором и статором происходит не по линии, а по поверхности. В этой конструкции пьезоэлемент *1* поляризован в тангенциальном направлении. При подключении электродов *2* к источнику переменного напряжения внешняя и внутренняя цилиндрические поверхности пьезоэлемен-

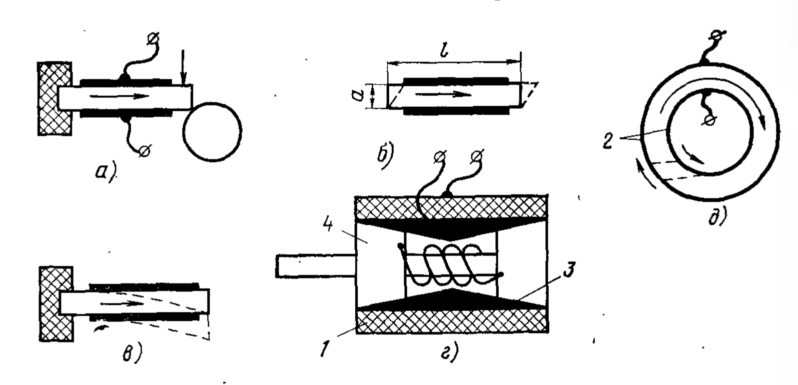


Рис. 23. Пьезоэлектродвигатели с пассивным ротором и возбуждением колебаиий сдвига.

та смещаются в противоположных направлениях (рис. 23,*д*). Внутренняя поверхность через износостойкую прокладку *3* взаимодействует с ротором *4*, возбуждая в нем радиальные колебания. Эти колебания обеспечивают зацепление ротора и статора в каком-либо одном направлении.

Возбуждение колебаний сдвига по толщине цилиндрической оболочки не улучшает условия согласования

осциллятора с нагрузкой. Для повышения к. п. д. приходится увеличивать толщину оболочки, увеличивая при этом объем пьезоэлемента. Поэтому рассмотренная конструкция является перспективной для ПД большой мощности (свыше 100 Вт); она не требует подшипников и оказывается компактнее других конструкций ПД.

20. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ С ПАССИВНЫМ РОТОРОМ И ВОЗБУЖДЕНИЕМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ. ПД С ПАССИВНЫМ СТАТОРОМ

Сочетание крутильных и продольных колебаний также может быть использовано при создании новых конструкций ПД. В отличие от колебаний сдвига по толщине цилиндрической оболочки, крутильные колебания в оболочке можно рассматривать как колебания сдвига по образующей цилиндра. Колебания сдвига по толщине в элементарном объеме могут быть возбуждены

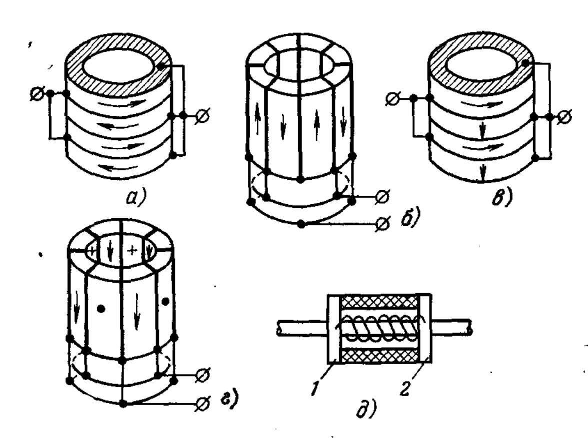


Рис. 24. Пьезоэлектродвигатели с пассивным ротором и возбуждением крутильных колебаний.

напряжениями, приложенными как по толщине, так и по длине пьезоэлемента. Соответствующие варианты возбуждения крутильных колебаний показаны на рис. 24,*а*, *б*. Для реализации этих вариантов пьезоэлемент изготавливают из нескольких склеенных частей. Если из каждых двух соседних секций одну поляризовать продольно, а другую по толщине, то крутильные колебания можно возбудить и в сплошном полом ци-

линдре. В этом случае электроды наносят на поверхность цилиндра в виде колец или полос (рис. 24, *в*, *г*).

Один из вариантов ПД с электрическим возбуждением крутильных колебаний показан на рис. 24,*д*. В этой конструкции возбуждение продольных колебаний происходит при угле контакта, равном нулю; поэтому для вращения ротора необходим пусковой момент.

Если осциллятор ПД с электрическим возбуждением крутильных колебаний рассчитать так, чтобы рабочими частотами были частоты первых мод крутильных и продольных колебаний, то части ротора *1* и *2* (рис. 24,*д*) будут вращаться в противоположных направлениях. Для того чтобы обеспечить вращение в одном направлении, номера мод крутильных и продольных колебаний должны отличаться на нечетное число.

Простейший двигатель с пассивным статором показан на рис. 25,*а*, *б*. В этой конструкции осциллятор, выполненный в виде диска *1*, закреплен на валу одним из способов, представленных на рис. 25,*в*. Напряжение через скользящие контакты *2* подается на осциллятор. На его поверхность опирается одна или несколько упругих пластинок *3*.

Один из предполагаемых механизмов работы такого двигателя заключается в следующем. Радиальные колебания, электрически возбуждаемые в диске, создают в месте контакта диска с пластиной переменную силу F, нормальную к поверхности диска. Составляющие этой силы $F_{пр}$ и $F_{изг}$ возбуждают продольные и изгибные колебания, которые формируют траекторию точки контакта.

В качестве осциллятора можно использовать и цилиндрическую оболочку (рис. 25,*г*, *д*). Для уменьшения износа на пьезоэлемент одевают стальной обруч или наносят слой износостойкого материала. Для увеличения мощности ПД осциллятор *1* окружают упругими пластинами *3*, которые одновременно позволяют устанавливать ротор в корпусе без подшипников (рис. 25,*б*).

Обращенный вариант ПД с осциллятором в виде цилиндрической оболочки позволяет исключить скользящие контакты (рис. 25,*е*). Использование осциллятора с возбуждением колебаний сдвига по толщине цилиндрической оболочки (рис. 25,*д*) дает возможность увеличить рабочие частоты ПД с пассивным статором. Наоборот, уменьшение частоты двигателя достигается при

возбуждении колебаний сдвига по образующей цилиндра, т. е. крутильных колебаний (рис. 25,*г*).

Пьезоэлектрические двигатели с пассивным статором имеют сравнительно невысокие удельные характеристики; их к. п. д. пока не превышают 20%, причем

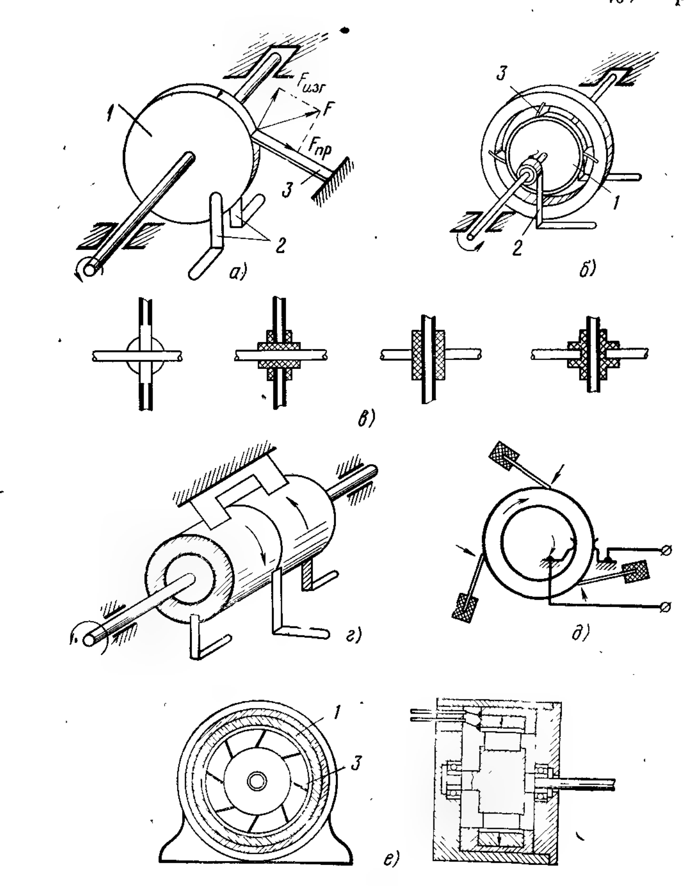


Рис. 25. Пьезоэлектродвигатели с пассивным статором.

двигатели являются нереверсивными и, как правило, низкооборотными. Следует, однако, отметить, что их акустические шумы имеют низкий уровень, что существенно при использовании указанных ПД для привода диска электропроигрывателя.

21. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ С ВЫСТУПАЮЩИМИ ПРОКЛАДКАМИ

Если применить износостойкую прокладку, значительно более тонкую, чем пьезоэлемент, и имеющую выступ относительно его торца, то резонатор продольных колебаний можно акустически изолировать от колебаний изгиба. Обычно для этих целей выступ располагают под углом к плоскости пьезоэлемента, близким к 45° (рис. 26,*а*). Угол контакта выбирают в пределах 30—80°.

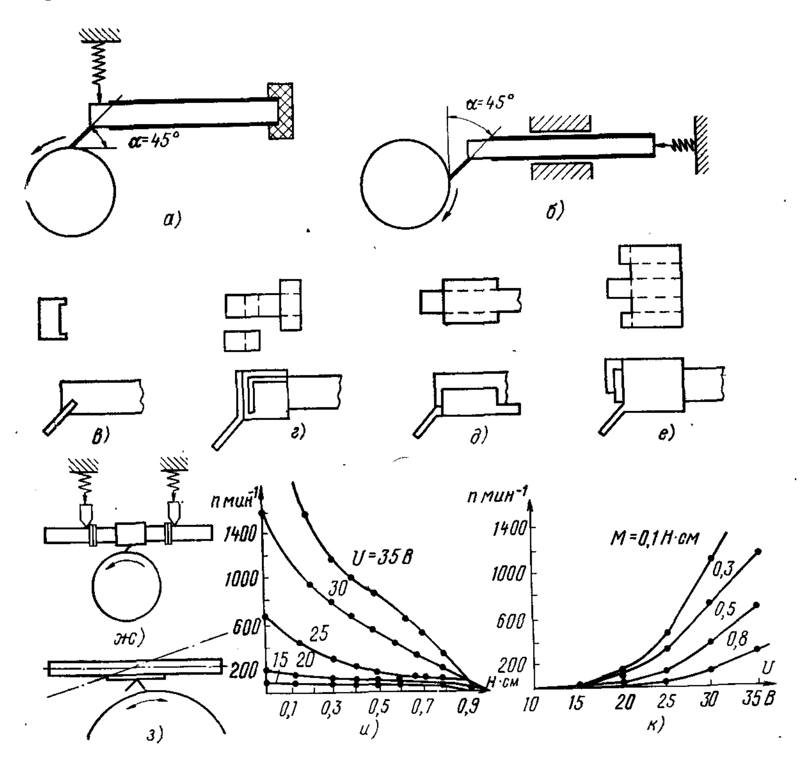


Рис. 26. Пьезоэлектродвигатели с выступающими прокладками, их характеристики.

В пьезоэлементе ПД с выступающей прокладкой колебания изгиба имеют очень малую амплитуду; она уменьшается с уменьшением толщины выступа. При контакте осциллятора с ротором резонансная частота практически не изменяется. Поэтому значительно снижена эффективность возбуждения субгармоник. При износе прокладки площадь контакта остается постоянной и сравнительно малой. Это является одной из причин стабильности работы ПД и также способствует уменьшению уровня субгармоник во всем диапазоне рабочих частот.

При изменении знака угла контакта (рис. 26,*б*) происходит изменение направления вращения, что используется для реверсирования ПД механическим способом. Узкая зона контакта способствует уменьшению потерь акустической энергии через ротор, что ослабляет реакцию ротора.

Перепад волнового сопротивления на конце осциллятора увеличивает степень отражения акустической энергии продольных колебаний от рабочего конца осциллятора, что наряду с малыми потерями в зоне контакта увеличивает добротность резонатора продольных колебаний. Увеличение добротности сопровождается заметным снижением напряжения питания ПД.

Благодаря тому что пьезоэлемент изолирован от колебаний изгиба прокладки, требования к выбору его размеров заметно снижаются. Появляется возможность в широких пределах изменять ширину пьезоэлемента и номер моды продольных колебаний. Кроме того, можно выбирать рабочую частоту точно равной частоте резонанса и за счет этого дополнительно снизить напряжение возбуждения ПД.

В ПД с выступающей прокладкой значительно ослаблены колебания входного сопротивления и мгновенной скорости за один оборот ротора. Механизм работы рассматриваемого двигателя еще недостаточно изучен. Предполагается, что работа этого двигателя, как и других НПД с пассивным ротором, основана на взаимодействии продольных и изгибных колебаний. Не исключается и возможность заклинивания и расклинивания при движении конца прокладки вперед и назад по поверхности ротора. Предполагаемый механизм возбуждения изгибных колебаний заключается в следующем. Продольные колебания частично отражаются от торца пьезоэлемента, а частично распространяются по выступу, создавая на его конце поперечную силу. При взаимодействии выступа с ротором эта сила возбуждает стоячие волны изгиба по длине выступа, который представляет собой консольно закрепленную пластину. Раз-

личные варианты выполнения выступов показаны на рис. 26,*в—е*.

Использование второй моды продольных колебаний позволяет создать двигатель с минимальными потерями на крепление и прижим пьезоэлемента (рис. 26,*ж*). Применяя износостойкую прокладку с двумя выступами, можно легко осуществить механический реверс ПД путем поворота осциллятора на небольшой угол (рис. 26,*з*).

Используя цилиндрическую оболочку или ее часть для возбуждения продольных колебаний по окружности, можно легко выполнить конструкцию ПД, показанную на рис. 25,*е*. Тот же принцип реализуется в двигателях с возбуждением радиальных колебаний в дисках или цилиндрических оболочках.

Зависимости частоты вращения n от момента нагрузки M и напряжения возбуждения U для одного из лабораторных образцов ПД с выступающей прокладкой (рис. 26,*а*) приведены на рис. 26,*и*, *к*. Осциллятор двигателя выполнен в виде прямоугольной пластины размером 32×7×2,5 мм с выступающей накладкой из стальной ленты толщиной 0,08 мм. Ротор двигателя диаметром 7 мм выполнен из минералокерамики ЦМ-332. Сила прижима 5 Н. Масса двигателя 30 г.

22. РЕВЕРСИВНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ С АКТИВНЫМИ РОТОРОМ И СТАТОРОМ

Двигатели, в которых ротор и статор содержат осцилляторы, фрикционно взаимодействующие между собой, относятся к ПД с активными ротором и статором; они являются реверсивными пьезоэлектрическими двигателями (РПД). Осцилляторы можно возбуждать как на одной частоте, так и на кратных частотах [27].

Простейшая конструкция ПД с активными ротором и статором показана на рис. 27,*а*. Ротор двигателя выполнен также, как и в ПД с пассивным статором; он содержит осциллятор радиальных (сдвиговых и крутильных) колебаний, возбуждение которых осуществляется через контактные кольца.

При подключении напряжения в осцилляторе статора возбуждаются продольные колебания, а в осцилляторе ротора — радиальные. Участок *АА* статора (рис. 27,*б*), соприкасающийся с ротором, двигается поступательно. Если диаметр ротора при этом изменяется так, как показано на рисунке, то при движении направо участок *АА* передает импульс ротору, а при движении налево механический контакт между ротором и статором нарушается и ротор продолжает двигаться по инерции. Легко убедиться, что при изменении фазы колебаний ротора или статора на 180° произойдет реверс.

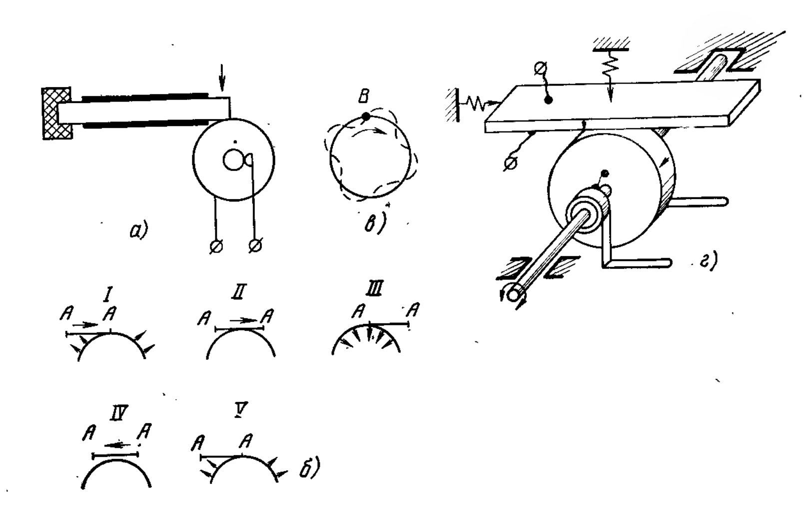


Рис. 27. Простейшие конструкции ПД с активными ротором и статором.

Описанный механизм работы ПД с активными ротором и статором принципиально отличается от всех рассмотренных ранее. По принципу действия двигатель напоминает шаговые двигатели с зубчатым ротором; отличие заключается в том, что каждый зуб формируется радиальными смещениями осциллятора ротора (на рис. 27,*в* показана траектория движения точки *В* поверхности осциллятора).

Из-за возбуждения колебаний изгиба при угле контакта, равном нулю, параметры рассмотренного ПД при вращении в прямом и обратном направлениях различаются. Этот недостаток устранен в ПД с возбуждением продольных колебаний второй моды (рис. 27,*г*).

В двигателях с активными ротором и статором полезную работу совершает осциллятор статора, а осциллятор ротора обеспечивает синхронное зацепление ро-

тора со статором. Поэтому доля потерь в роторе в общих потерях двигателя является существенной. Для ее снижения необходимо уменьшить объем пьезоэлектрической части ротора. С этой целью его пьезоэлемент выполняют в виде цилиндрической оболочки (рис. 28,*а*).

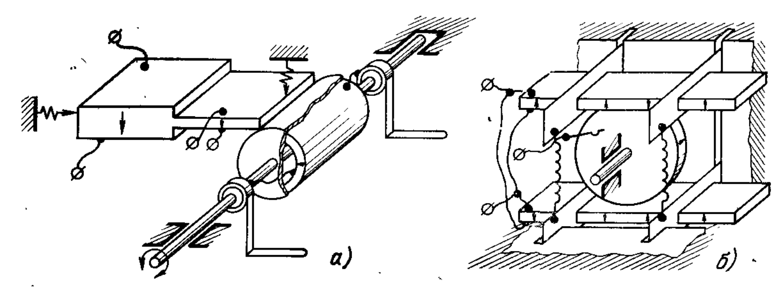


Рис. 28. Пьезоэлектродвигатели с активными ротором и статором, обладающие высоким к. п. д.

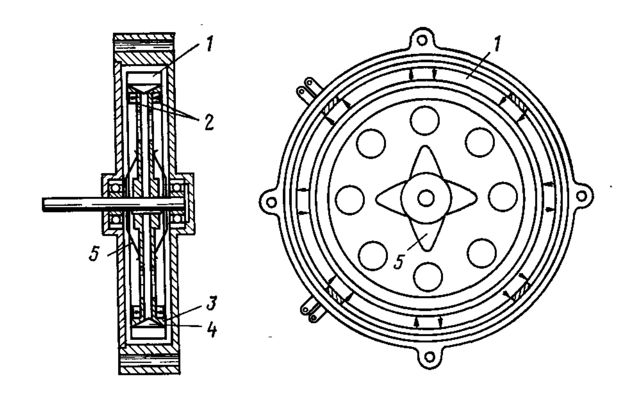


Рис. 29. Плоская конструкция ПД.

Если вокруг ротора расположить два осциллятора (рис. 28,*б*), то можно еще в 2 раза снизить влияние потерь в роторе на к. п. д. двигателя. Соединяя концы осцилляторов, получают компактную конструкцию ПД с активными ротором и статором (рис. 29). В этой конструкции продольные колебания восьмой моды возбуждаются по длине окружности осциллятора статора, выполненного в виде цилиндрической оболочки *1*. Осциллятор ротора выполнен в виде двух колец *2*, помещенных внутри ободов *3*, которые фрикционно взаимодействуют с износостойкими прокладками *4*. Эти прокладки

расположены в местах максимумов колебательных скоростей осциллятора статора (через один). Ободы, установленные на оси ротора, имеют возможность осевого перемещения. С помощью пружин *5* они прижимаются к износостойким прокладкам.

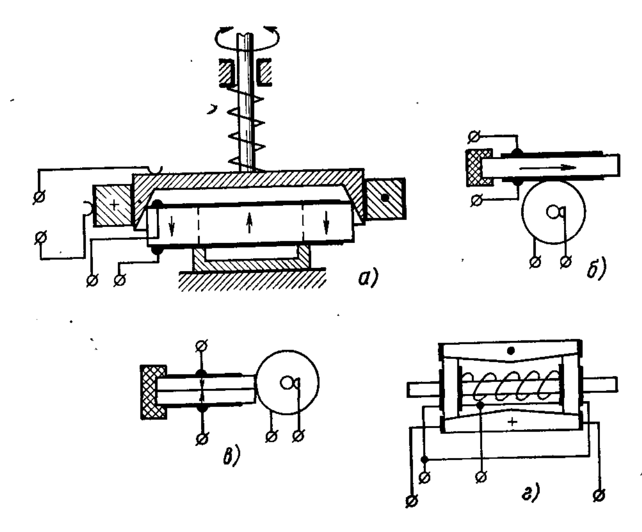


Рис. 30. Реверсивные ПД.

Двигатели с активными ротором и статором можно проектировать для самых различных сочетаний типов колебаний. Так, в конструкции, показанной на рис. 30, *а*, осциллятор статора возбуждает сдвиговые смещения внутренней поверхности цилиндрической оболочки, которая взаимодействует с радиальными колебаниями третьей моды осциллятора ротора. В конструкции, показанной на рис. 30, *б*, в осцилляторе статора возбуждаются колебания сдвига, а в конструкции, показанной на рис. 30,*в*, — колебания изгиба. Располагая осциллятор радиальных колебаний внутри цилиндрической оболочки, получаем двигатель с крутильными колебаниями осциллятора статора (рис. 30, *г*).

В настоящее время трудно определить место ПД с активными ротором и статором среди других ПД. Они конструктивно сложнее, и поэтому оптимизация их конструкций еще не проводилась. Среди преимуществ указанных двигателей можно отметить ожидаемую высокую

удельную мощность, обусловленную тем, что вся акустическая энергия распределяется в роторе и статоре. Пьезоэлектрические двигатели с активными ротором и статором имеют симметричные характеристики при прямом и обратном направлениях вращения, устойчиво работают при износе и, следовательно, имеют ресурс, больший, чем ПД с пассивным ротором. Возможность раздельного управления колебаниями каждого типа позволяет легко конструктивно подавлять колебания паразитных субгармонических мод.

В ПД с активными ротором и статором акустическая энергия переходит из ротора в статор и наоборот. Если в ПД с пассивным ротором можно улучшить условие полного отражения путем использования роторов с высоким волновым сопротивлением, то этого нельзя сделать в ПД с активными ротором и статором. В ПД с пассивным статором можно обеспечить полное отражение, выбирая соответствующим образом угол контакта. В ПД с активными ротором и статором угол контакта для колебаний одного из типов равен 90°, поэтому значительная часть энергии этих колебаний проходит из одного осциллятора в другой.

В некоторых случаях ПД с активными ротором и статором используют в режиме работы с пассивным ротором при вращении в прямом направлении. При этом угол контакта чаще всего выбирают равным 45°. При вращении в обратном направлении подключают осциллятор ротора, а осциллятор статора может быть как включен, так и выключен. Такой режим используют тогда, когда рабочим является вращение ротора в прямом направлении. При вращении в обратном направлении осциллятор ротора используют для снятия трения, что чаще всего осуществляется с помощью внешнего вращающего момента. Такой режим применяют, например, в ПД, используемых для привода лентопротяжных механизмов магнитофонов.

23. РЕВЕРСИВНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ И ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Электрическое возбуждение продольных и поперечных колебаний позволяет создать РПД при использовании конструкций с пассивным ротором. При электрическом

возбуждении колебаний двух типов траектория движения контактной точки изменяется автоматически при изменении нагрузки и температуры, а также при износе конца пьезоэлемента и при временных изменениях параметров пьезокерамики.

Наиболее широко используются ПД с электрическим возбуждением продольных и изгибных колебаний по длине пластины. В одной из конструкций (рис. 31, *а*) часть осциллятора (по толщине) выполняется пьезоэлектричес-

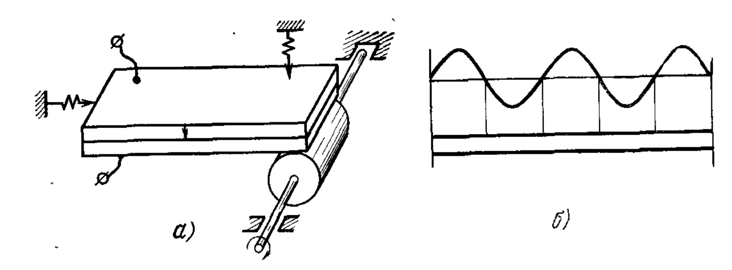


Рис. 31. **Пьезоэлектродвигатели с возбуждением продольных и изгибных колебаний по длине пластины.**

ки пассивной, например, из металла. В этом случае за счет несимметрии осциллятора относительно нейтральной плоскости в нем одновременно возбуждаются продольные и изгибные колебания.

Проектируя двигатель по заданным требованиям, необходимо установить определенное соотношение между продольной и изгибной составляющими колебаний. В настоящее время это делается следующим образом. Для заданного номера моды колебаний изгиба строят эпюру механических напряжений (рис. 31, *б*) и определяют зоны с одинаковыми знаками напряжений. Затем, уменьшая площади электродов указанных зон, постепенно увеличивают соотношение между изгибной и продольной компонентами деформации. В случае если оно недостаточно для формирования необходимой траектории движения контактной точки, изменяют соотношение между длиной и толщиной пьезоэлемента и тем самым раздвигают частоты продольного и изгибного резонансов. Смещая рабочую частоту, изменяют соотношение между амплитудами и фазами продольных и изгибных колебаний.

Наличие в осцилляторе пьезоэлектрически пассивных частей заметно снижает эффективность электромеханического преобразования энергии. Этого недостатка лишен осциллятор, выполненный в виде двух пластин из пьезоэлектрического материала.

На рис. 32, *а* показана конструкция осциллятора, в котором возбуждаются колебания второй моды. Одна из

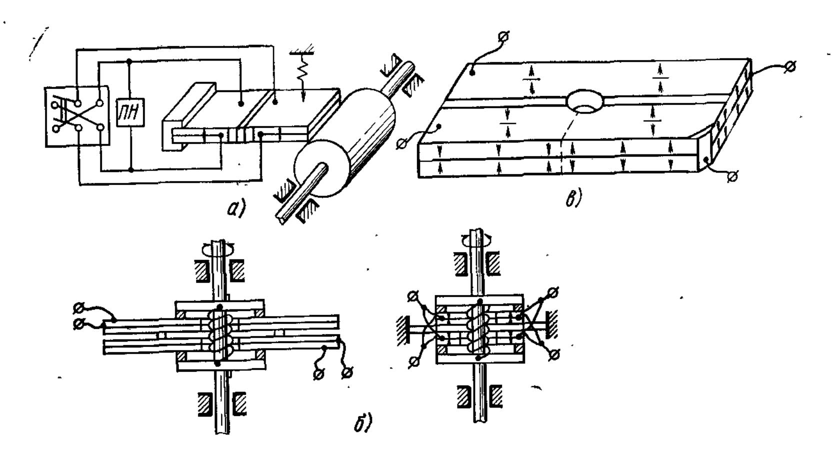


Рис. 32. Конструкции осциллиторов ПД.
ПН — преобразователь напряжения, обеспечивающий питание двигателя.

частей осциллятора служит для возбуждения колебаний изгиба, а другая — для возбуждения продольных колебаний. Соотношение между амплитудами этих колебаний легко изменяется регулировкой напряжения питания; сдвиг фаз определяется фазосдвигающей цепью. Изменение сдвига фаз на 180° приводит к реверсу ПД.

Чтобы обеспечить равенство параметров ПД при вращении в прямом и обратном направлениях, осциллятор выполняют симметричным относительно ротора и в нем возбуждают продольные и изгибные колебания с четными модами.

В рассмотренных ПД с осцилляторами в виде пластин контакт между ротором и статором осуществляется по цилиндрической поверхности ротора. Известны также конструкции ПД, в которых рабочими являются торцевые поверхности ротора (рис. 32,*б*). В таком двигателе используется биморфный пьезоэлемент; его размеры и направление поляризации обеспечивают возбуждение

вторых мод колебаний, продольных по длине и изгибных по ширине пьезоэлемента (рис. 32, *в*). Указанное сочетание колебаний формирует необходимые траектории движения контактных точек. Реверс ПД осуществляется как изменением фаз напряжения питания (обычно в секции возбуждения продольных колебаний), так и изменением рабочей частоты двигателя.

24. РЕВЕРСИВНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ С МОНОМОРФНЫМ ОСЦИЛЛЯТОРОМ И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА ЗАКЛИНИВАНИЯ

При работе ПД в месте склейки пластин возникают значительные механические напряжения. Кроме того, сам пьезоэлемент может нагреваться до температуры 100—200°С. Все это предъявляет жесткие требования к качеству соединения пластин. Практически только склеивание неорганическими материалами обеспечивает надежную работу осциллятора.

Для того чтобы исключить склеивание пластин, были разработаны конструкции ПД с мономорфными осцилляторами продольных и поперечных колебаний. Одна из таких конструкций показана на рис. 33, *а*. Осциллятор выполнен в виде узкой пластины, причем конфигурация электродов обеспечивает возбуждение как продольных, так и изгибных колебаний. Для соединения электродов производится металлизация поверхности пьезоэлемента путем химического осаждения металла.

Наряду с преимуществами по сравнению с биморфными осцилляторами такая конструкция имеет и существенный недостаток — пониженный ресурс, обусловленный уменьшением площади контакта. Этого недостатка лишена мономорфная конструкция, показанная на рис. 33, *б*; она обеспечивает достаточно большую площадь контакта и проста в изготовлении. Но такому осциллятору присущ свой недостаток — низкая эффективность возбуждения колебаний изгиба, которую приходится компенсировать высоким уровнем напряжения питания.

Таким образом, выбор конструкции РПД с электрическим возбуждением продольных и поперечных колебаний определяется конкретными требованиями к двигателю (напряжением питания, стоимостью, ресурсом).

Как было показано выше, возбуждение в осцилляторе колебаний изгиба изменяет направление вращения

ротора по отношению к направлению, соответствующему возбуждению продольных колебаний. Следовательно, если одна часть осциллятора возбуждает колебания изгиба, а вторая — продольные, то, попеременно возбуждая эти части, можно реверсировать двигатель. Указанный способ реверса легко реализуется в конструкциях, показанных на рис. 32,*а*, 33; при этом угол контакта выбирают близким к 45°. При таком угле контакта за счет за-

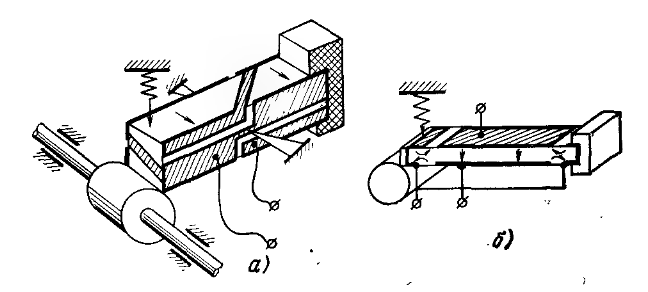


Рис. 33. РПД с мономорфными осцилляторами.

клинивания увеличивается трение и возможно полное отражение продольных и поперечных колебаний. Следовательно, к. п. д. рассматриваемых двигателей может приближаться к максимальным значениям к. п. д. нереверсивных двигателей.

Изучение РПД, в которых используется эффект заклинивания, позволило обнаружить еще один способ реверса. В двигателе описанной конструкции, в котором одновременно электрически возбуждены и продольные и изгибные колебания, существуют две рабочие частоты, на которых вращение происходит в разные стороны. Изменяя площади электродов, предназначенных для возбуждения изгибных и продольных колебаний, можно обеспечить симметрию характеристик РПД для обоих направлений вращения. При этом обычно площадь электродов для возбуждения изгибных колебаний выбирается большей. Схема коммутации РПД, управляемого по частоте, значительно проще, чем схема переключения обкладок; поэтому интерес к таким двигателям особенно велик.

Приведем характеристики одного из РПД рассмотренного типа: мощность на валу 0,5—0,7 Вт; напряжение питания 100—150 В, частота вращения 100—300 мин$^{-1}$,

масса 40 г. В двигателе применен осциллятор продольных и изгибных колебаний второй моды. К. п. д. двигателя 10—15%, что соответствует НПД с возбуждением второй моды колебаний изгиба. Конструкция двигателя показана на рис. 33, *а*.

25. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Сочетания продольных, изгибных, крутильных колебаний и колебаний сдвига дают большое число различных вариантов конструктивного выполнения ПД. Их принцип построения заключается в том, что два выбранных акустически слабо связанных типа колебаний должны быть взаимно ортогональными и сдвинуты по фазе. Целесообразно также, чтобы рабочая частота двигателя одновременно находилась в зонах резонанса для колебаний одного и другого типа. Сдвиг фаз колебаний достигается путем смещения резонанса колебаний одного из типов относительно рабочей частоты ПД либо путем сдвига фаз одного из электрических сигналов относительно другого, осуществляемого при помощи фазосдвигающей цепи.

С учетом этих принципов ПД с возбуждением продольных и крутильных колебаний может быть, например, выполнен, как показано на рис. 34, *а*. В двигателе в левой части осциллятора возбуждаются крутильные колебания четных (нечетных) мод, которые передают импульс движения ротору. Правая часть осциллятора возбуждает продольные колебания нечетных (четных) мод, в результате чего происходит передача ротору крутильных колебаний осциллятора. В ПД, показанном на рис. 34, *б*, возбуждаются колебания сдвига по толщине цилиндрической оболочки в направлении ее образующей и крутильные колебания нечетных мод.

В конструкции, представленной на рис. 34, *в*, сочетаются колебания сдвига по толщине в направлении окружности и в направлении образующей цилиндра. Колебания сдвига и продольные колебания по толщине возбуждаются в ПД, показанном на рис. 34,*г*. Это же сочетание возможно и в цилиндрической конструкции с той лишь разницей, что продольные колебания и колебания сдвига возбуждаются в двухслойной цилиндрической оболочке. Такое решение позволяет сделать всю цилин-

дрическую поверхность ротора рабочей и за счет этого значительно увеличить ресурс двигателя.

Успешно опробован вариант РПД с возбуждением изгибных колебаний по толщине и ширине осциллятора с распространением волн по его длине (рис. 35, *а*). В таком двигателе осциллятор выполняют в виде бруска с

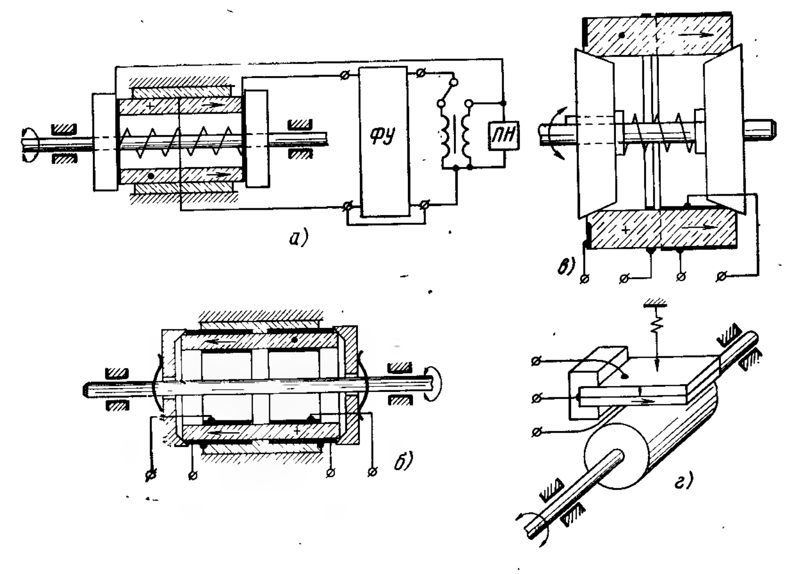


Рис. 34. Конструкции РПД.
ФУ — фазосдвигающее устройство.

двумя щелями, расположенными во взаимно перпендикулярных плоскостях. Эти щели после металлизации их поверхностей заполняют клеем. В результате получают две биморфные части бруска, в которых возбуждаются несвязанные взаимно ортогональные колебания изгиба.

Пьезоэлектрический двигатель с пассивным ротором может быть построен и на основе осциллятора радиальных и продольных колебаний. Эти колебания являются слабо связанными, что позволяет обеспечить между ними сдвиг фаз, необходимый для формирования заданной траектории движения контактной точки. На рис. 35, *б* показан один из возможных вариантов такого двигателя с осциллятором, выполненным в виде полого цилиндра. Для устранения изгибных колебаний используют два ро-

тора, фрикционно взаимодействующие с осциллятором. Реверс ПД осуществляется путем изменения частоты.

В настоящее время не представляется возможным дать полную оценку каждой из описанных конструкций, поскольку изучение и применение ПД пока идут по пути реализации простейших (в технологическом отношении) конструктивных вариантов, чаще всего с осцилляторами в виде однослойных прямоугольных пластин. Поэтому ограничимся лишь приведенными ниже общими соображениями.

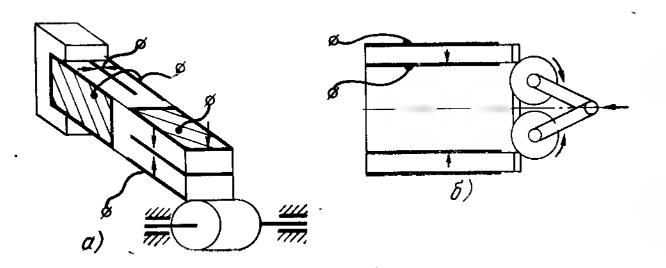


Рис. 35. Варианты РПД с возбуждением изгибных колебаний по толщине и ширине осциллятора (*а*) и с возбуждением радиальных и продольных колебаний (*б*).

Пьезоэлектрические двигатели с возбуждением колебаний изгиба по ширине и толщине являются самыми низкочастотными двигателями и могут быть спроектированы для работы в диапазоне частот от 30 Гц до 100 кГц.
Они должны быть самыми маломощными и самыми экономичными (по потребляемой на входе мощности и по к. п. д.). Пьезоэлектрические двигатели с возбуждением крутильных и продольных колебаний могут быть спроектированы для диапазона частот от 20 до 200 кГц, с возбуждением крутильных колебаний и колебаний сдвига — от 50 до 500 кГц, с возбуждением продольных колебаний и колебаний сдвига по толщине — от 100 до 1000 кГц. Можно предположить, что по мере увеличения рабочей частоты удельная мощность будет возрастать.

При этом ожидается уменьшение к. п. д., так как будут ухудшаться условия согласования осциллятора с внешней нагрузкой.

26. УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ПД. ДВИГАТЕЛИ С МЕХАНИЧЕСКИМ РЕВЕРСОМ

В простейшем случае реверс РПД осуществляется с помощью реле или переключателей (см. рис. 32, *а*). Применению для этих целей бесконтактных устройств в ряде случаев препятствует сложность коммутации высокочастотных напряжений возбуждения ПД, имеющих большие амплитуды (до 100—400 В). Такой проблемы

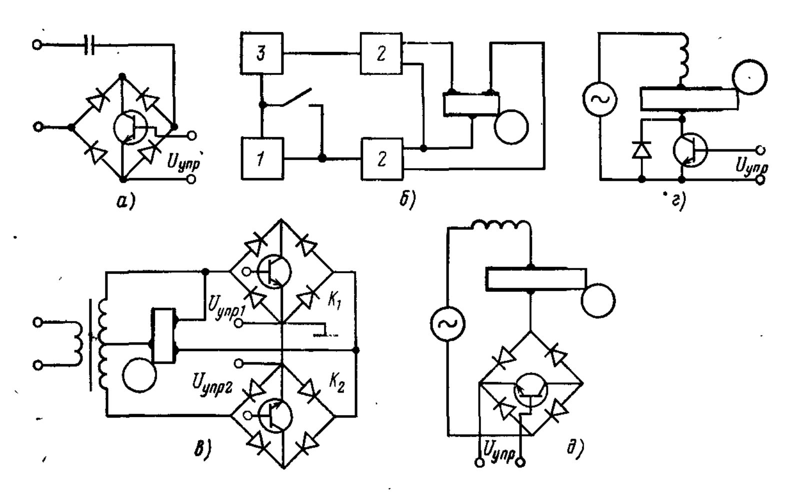


Рис. 36. Схемы электрического управления скоростью ПД.

практически нет для РПД с реверсом, осуществляемым за счет изменения частоты. Для этих двигателей достаточно изменить параметры цепи, задающей частоту генератора.

В одних случаях указанная цепь содержит управляемый *LC*-контур, в других случаях подключаются дополнительная катушка или конденсатор, например, с помощью схемы, показанной на рис. 36, *а*. В качестве управляемых реактивных элементов используют варикапы, вариконды, дроссели с насыщением. Генераторы с частотозадающими *RC*-цепями управляются по частоте изменением напряжения смещения или активного сопротивления, в качестве которого обычно используют сопротивление транзистора. Описанные принципы применяют также для управления частотой вращения ПД, регулируемых по частоте. Для уменьшения области управления

по частоте и увеличения крутизны характеристики управления последовательно с ПД включают узкополосный фильтр (чаще всего двухполюсный пьезоэлемент) или осуществляют возбуждение двигателя от пьезоэлектрического трансформатора.

Реверс РПД с электрически раздельным возбуждением колебаний двух типов производят путем включения инвертора фазы *1* в один из каналов возбуждения (рис. 36, *б*). Эти каналы состоят из усилителей мощности сигнала *2*, работающих от общего задающего генератора *3*. Инвертор часто совмещают с указанным генератором. Если усилитель мощности имеет трансформаторный выход, реверс целесообразно осуществлять с помощью ключей переменного напряжения K_1 и K_2, которые управляются напряжением $U_{упр1}$ и $U_{упр2}$, например, как показано на рис. 36,*в*. При подаче сигнала $U_{упр1}$ двигатель вращается в одну сторону, при подаче $U_{упр2}$ — в другую. Ключи K_1 и K_2 широко используют также для коммутации нескольких ПД.

Двигатели, для которых управление по частоте нецелесообразно, регулируют изменением напряжения возбуждения, что осуществляется по схемам, показанным на рис. 36,*г, д*. В этих схемах в качестве линейно управляемого сопротивления используют транзистор. Поскольку потери на сопротивление снижают общий к. п. д., более экономично управление двигателем за счет изменения ширины импульсов питающего напряжения. Если усилитель мощности работает в режиме *А* или *В*, то управление скоростью осуществляется путем изменения входного напряжения или напряжения смещения транзисторов усилителя.

Реверс электрически нереверсируемых ПД можно осуществлять механически; при этом двигатель не теряет преимуществ нереверсивных ПД. Конструкция механически реверсируемого двигателя, содержащего два осциллятора, показана на рис. 37,*а*. При применении одного осциллятора может быть использована одна из конструкций, представленных на рис. 37,*б*, *в*. Фиксация пьезоэлемента осуществляется с помощью пластмассовой вилки, выполненной, например, из стеклотекстолита. Вилка имеет возможность угловых и продольных перемещений; она снабжена кулачком *1*, который связан с рычагом управления *2* (рис. 37,*б*). В конструкциях с двумя осцилляторами мощность, затрачиваемая иа реверс,

больше, чем в конструкциях с одним осциллятором. Кроме того, использование двух осцилляторов усложняет коммутацию и настройку. Реверс ПД с осциллятором в виде полого цилиндра осуществляется по схеме, показанной на рис. 37,*г*.

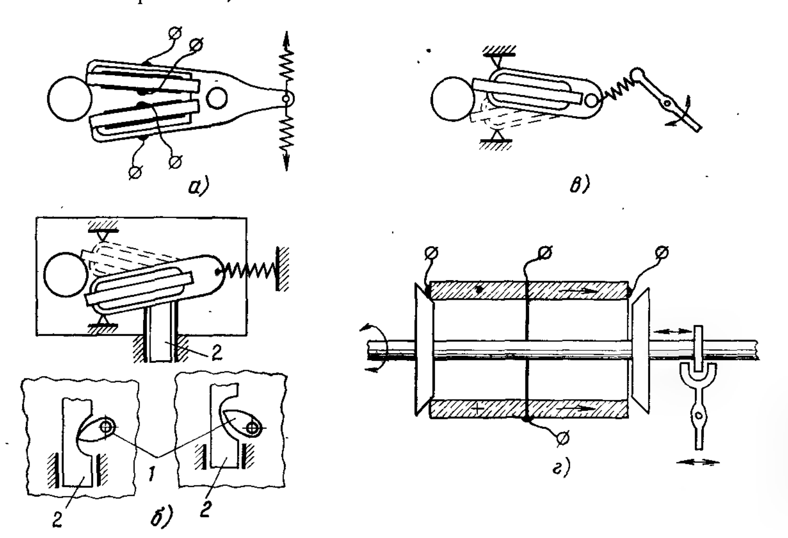


Рис. 37. Пьезоэлектродвигатели с механическим реверсом.

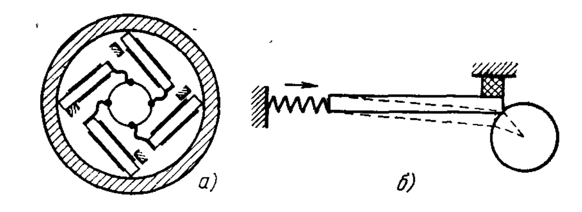


Рис. 38. Пьезоэлектродвигатели с торцевым прижимом.

Параметры ПД зависят от силы прижима и от угла контакта осциллятора с ротором. Эти свойства используют для управления мгновенной и средней частотой вращения двигателя. Прижим осциллятора к ротору осуществляют с помощью электромагнита и, изменяя ток в его обмотке, изменяют силу прижима.

Используя конструкции с торцевым и центробежным прижимом, например показанную на рис. 38,*а*, вводят

положительную или отрицательную обратную связь по частоте вращения; с помощью этой связи формируют необходимую зависимость частоты вращения от момента на валу. Если начальная сила прижима меньше силы, соответствующей максимальной частоте вращения, то связь по частоте вращения положительна (см. рис. 13,*в*); такая связь увеличивает зависимость частоты вращения от момента на валу двигателя. Выбирая начальную силу прижима больше, чем сила при минимальной частоте вращения, можно стабилизировать частоту вращения.

Автоматическое управление частотой вращения путем изменения угла контакта осуществляется в конструкциях ПД с торцевым прижимом осциллятора (рис. 38,*б*). С увеличением момента на валу осциллятор под действием силы реакции ротора смещается назад, изменяя угол контакта. Если угол, соответствующий оптимальной частоте вращения, меньше 45°, то обратная связь отрицательна; если больше 45°, то связь положительна.

27. СПОСОБЫ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ПД

Максимальная мощность на валу двигателя зависит от его к. п. д. и предельно допустимой мощности потерь. Для многих промышленных пьезокерамических материалов эта мощность определяется не температурой нагрева, а пределом прочности осциллятора. В результате чаще всего максимальная мощность на валу ПД определяется не теплоизлучающей поверхностью, а объемом осциллятора. Одним из ограничений длины осциллятора является рабочая частота двигателя, которая в большинстве случаев не может находиться в области звуковых частот. Кроме того, само по себе увеличение длины осциллятора не увеличивает мощность на валу ПД. Действительно, амплитуда смещения конца осциллятора, выполненного в виде пластины длиной l, при продольных колебаниях первой моды вдоль ее длины определяется формулой

$$A = 2T_{ц}l/\pi Y_1^E,$$

где $T_{ц}$ — механическое напряжение в центре пластины.

Используя эквивалентные схемы замещения [13], получим следующее соотношение для скорости свободного конца пьезопластины:

$$v = 8lUd_{31}fQ_{м}/\pi a,$$

где U — напряжение питания (резонансной частоты f); d_{31} — пьезоэлектрический модуль; $Q_{м}$ — механическая добротность материала осциллятора; a — толщина пьезопластины.

Учитывая, что $f = c/2l$, где c — скорость звука в пьезоэлементе, имеем:

$$v = 4Ud_{31}cQ_{м}/\pi a,$$

т. е. скорость конца пьезопластины не зависит от ее длины.

Предположим, что смещение рабочего конца осциллятора пренебрежимо мало по сравнению с радиусом ротора и, следовательно,

конец осциллятора движется в плоскости, проходящей через линию касания осциллятора с ротором. Это допущение дает возможность пренебречь угловыми перемещениями конца осциллятора и считать, что осциллятор перемещается поступательно. Кроме того, предположим, что сдвиг фаз между продольными и поперечными колебаниями близок к нулю и поэтому приближенно траекторию движения контактной точки можно считать отрезком прямой.

С учетом принятых допущений, которые соответствуют оптимальной работе ПД, получаем следующую формулу для скорости рабочего конца осциллятора:

$$v_{\text{р.к}} = v/\cos\alpha = 4Ud_{31}cQ_{\text{м}}/\pi a \cos\alpha,$$

где α — угол контакта осциллятора с ротором.

Эта формула получена без учета потерь энергии в местах крепления и прижима осциллятора, а также без учета рассеяния энергии в роторе. Указанные потери учитываются введением эффективной добротности осциллятора $Q_{\text{эфф}}$.

Максимальное тангенциальное усилие $F_{\text{т}}$ [28], которое действует со стороны осциллятора на ротор, определяется соотношением

$$F_{\text{т}} = Ubd_{31}Y_1^E\cos\alpha,$$

где b — ширина пьезопластины.

Учитывая, что осциллятор отдает энергию ротору только при движении в одном направлении, получим следующую формулу для мощности двигателя:

$$N = \frac{1}{2}F_{\text{т}}v_{\text{р.к}} = 2bU^2d^2_{31}cQ_{\text{м}}Y_1^E/\pi a.$$

Если скорость конца осциллятора линейно зависит от нагружающего момента, то половина этой мощности может быть передана в нагрузку.

Оценим предельно допустимую мощность, развиваемую ПД на валу. Необходимо учесть, что максимальная тангенциальная сила создается бегущей волной, так как на конце осциллятора расположен узел стоячей волны напряжения. Наоборот, скорости концов осциллятора определяются стоячей волной.

Предположим, что эффективной добротности $Q_{\text{эфф}}$ соответствует полное сопротивление механических потерь $R_{\text{м.п}} = R_{\text{м}} + R_{\text{к}} + R_{\text{н.вн}}$, где $R_{\text{м}}$ — сопротивление потерь в материале осциллятора; $R_{\text{к}}$ — сопротивление конструкционных потерь, состоящих из потерь в деталях крепления, прижима и в роторе; $R_{\text{н.вн}} = R_{\text{н}}/\cos^2\alpha$ — сопротивление нагрузки, внесенное в механическую часть.

Скорость рабочего конца нагруженного осциллятора и тангенциальная сила, развиваемая двигателем, определяются формулами

$$v_{\text{р.к}} = Ubd_{31}Y_1^E/R_{\text{м.п}}\cos\alpha;$$

$$F_{\text{т}} = \frac{Ubd_{31}Y_1^E R_{\text{н}}}{R_{\text{м.п}}\cos^2\alpha}.$$

Для силы, действующей в центре осциллятора, имеем:

$$F_{\text{ц}} = Ubd_{31}Y_1^E Q^{\text{н}}_{\text{эфф}},$$

где $Q^{\text{н}}_{\text{эфф}}$ — добротность нагруженного осциллятора.

Полагая, что эта сила равна своему предельно допустимому значению $F_{\text{п.доп}}$, находим предельное напряжение возбуждения осциллятора

$$U_{\text{п.доп}} = F_{\text{п.доп}}/bd_{31}Y_1^E Q^{\text{н}}_{\text{эфф}}.$$

Таким образом, поскольку мощность на нагрузке определяется формулой

$$N = U^2b^2d^2_{31}(Y_1^E)^2R_{\text{н}}/R^2_{\text{м.п}}\cos^2\alpha,$$

для ее предельно допустимого значения получаем:

$$N_{\text{п.доп}} = \frac{F^2_{\text{п.доп}}R_{\text{н}}}{(Q^{\text{н}}_{\text{эфф}})^2 R^2_{\text{м.п}}\cos^2\alpha}.$$

Это соотношение является приближенным, так как получено без учета колебаний изгиба, заметно снижающих $F_{\text{п.доп}}$; оно применимо только тогда, когда ПД возбуждают от источника тока. На практике значительно чаще ПД питают от источника с небольшим внутренним сопротивлением. В последнем случае, если двигатель рассчитан на предельно допустимую мощность, то отключение нагрузки приводит к разрушению пьезоэлемента. Поэтому предельно допустимое напряжение питания следует рассчитывать для режима холостого хода

$$U_{\text{п.доп}} = F_{\text{п.доп}}/bd_{31}Y_1^E Q_{\text{эфф}}.$$

Если не учитывать конструкционные потери, то можно получить формулы для предельно допустимой линейной скорости ротора

$$v_{\text{п.доп}} = \frac{4F_{\text{п.доп}}c}{\pi ab\cos\alpha Y_1^E} = \frac{4F_{\text{п.доп}}}{\pi\cos\alpha Z_0} = \frac{4T_{\text{п.доп}}c}{\pi\cos\alpha Y_1^E},$$

где $T_{\text{п.доп}}$ — предельно допустимое механическое напряжение; $Z_0 = ab\sqrt{\rho Y_1^E}$ — волновое сопротивление осциллятора; ρ — плотность материала пьезопластины.

Таким образом, для заданных углов α скорость зависит только от свойств материала осциллятора. Для пьезокерамического материала PZT-5 предельная динамическая прочность на разрыв равна $2{,}8\cdot10^7$ Н/м² [23]. Расчетное значение $v_{\text{п.доп}}$ для этого материала равно 2,54 м/с. При диаметре ротора $D = 1$ см соответствующая частота вращения составляет $v_{\text{п.доп}}/\pi D = 81$ с⁻¹.

Для повышения мощности на валу ПД необходимо, изменяя длину осциллятора, одновременно увеличивать номер моды колебаний, возбуждаемых вдоль его длины. Увеличение толщины прямоугольного осциллятора НПД без изменения длины связано с переходом на более низкую моду колебаний изгиба, что приводит к уменьшению к. п. д. и поэтому не всегда оправдано. Увеличение ширины осциллятора повышает мощность ПД, но ширину можно увеличивать только до определенного предела, после которого необходимо увеличивать также длину и толщину осциллятора.

Если возбудить в осцилляторе упругие волны, распространяющиеся по ширине пластины (рис. 39,*а*), то увеличивая длину осциллятора, можно значительно повысить мощность ПД. Другим решением является увеличение числа осцилляторов, которые располагают как в плоскости, параллельной оси вращения (рис. 39,*б*), так и в плоскости, перпендикулярной этой оси (рис. 39,*в*). В последнем случае значительно повышается стабильность мгновенной частоты

вращения и одновременно увеличивается частота ее колебаний, что улучшает сглаживание при использовании маховиков.

Применение нескольких роторов (рис. 39,*г*, *д*) позволяет увеличить к. п. д. двигателя и за счет этого также увеличить его мощность. Кроме того, использование нескольких роторов позволяет значительно упростить устройство, в котором применяется ПД, в тех случаях, когда каждый из роторов является рабочим; примером такого устройства является электробритва. Если на втором конце

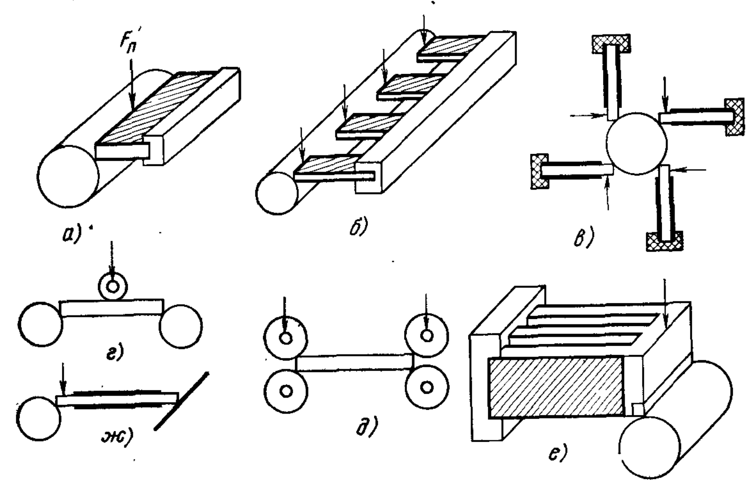


Рис. 39. Пьезоэлектродвигатели, обеспечивающие увеличение мощности на валу.

осциллятора установить второй ротор или наклонную плоскость (рис. 39,*г*, *ж*), то увеличится составляющая изгибных колебаний и при некоторых соотношениях между номерами мод продольных и изгибных колебаний изменится направление вращения ротора.

Мощность ПД с мономорфным осциллятором изгибных колебаний (рис. 33) может быть увеличена, если осциллятор склеить из нескольких пьезопластин. Однако более технологичным является выполнение осциллятора в виде бруска со щелями (рис. 39,*е*). Для увеличения прочности осциллятора щели после нанесения электродов заливают компаундом. В таких конструкциях в разных зубцах осциллятора можно электрически возбуждать колебания разных типов. Изменяя фазу колебаний одного из типов, можно реверсировать ПД.

28. НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ ПД

Питание ПД можно осуществлять от преобразователей напряжения, собранных по бестрансформаторным схемам. В этом случае двигатели следует рассчитывать на напряжения от нескольких вольт до 300 В (в зависимости от напряжения первичного источника питания).

В отличие от электромагнитных двигателей выполнить ПД на высокие напряжения не представляет трудностей. Для этого можно уменьшать площадь электродов, осуществлять частичную деполяризацию материала, использовать материалы с низким значением пьезомодуля d_{31}

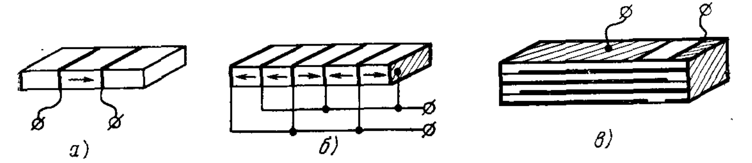


Рис. 40. Пьезоэлементы, рассчитанные на пониженное напряжение питания.

(например, пьезокерамику ЦТС-22). Разнося резонансные частоты продольных и поперечных колебаний, можно в широких пределах изменять требуемое напряжение питания ПД.

Увеличение напряжения возбуждения двигателя за счет уменьшения коэффициента электромеханической связи материала может быть использовано в тех случаях, когда последовательно с ПД включена индуктивность, нейтрализующая входную емкость двигателя. С увеличением напряжения ПД необходимая индуктивность обычно возрастает; кроме того, повышаются требования к межвитковой изоляции. Все это приводит к увеличению размеров катушки, что часто заставляет отказаться от ее применения.

Для уменьшения емкостной составляющей входного сопротивления ПД при включении без нейтрализующей индуктивности пьезоэлемент выполняют из материала с высоким коэффициентом электромеханической связи. При этом электроды располагают на боковых или торцевых гранях пьезоэлемента. Расположение электродов на торцевых гранях позволяет использовать один из самых высоких коэффициентов электромеханической связи материала k_{33}. Если при этом напряжение, необходимое для возбуждения двигателя, оказывается выше заданного, то на пьезоэлемент наносят кольцевые электроды, позволяющие снизить напряжение питания (рис. 40,*а*, *б*). Такой ПД целесообразно проектировать, например, для преобразователей с питанием от сети напряжением 220 В. Способ увеличения напряжения путем увеличения меж-

дуэлектродного промежутка применим для всех конструкций ПД независимо от типа возбуждаемых колебаний. Для уменьшения напряжения питания целесообразно возбуждать колебания более высоких мод, так как, увеличивая рабочую частоту, можно снизить напряжение обратно пропорционально квадрату частоты.

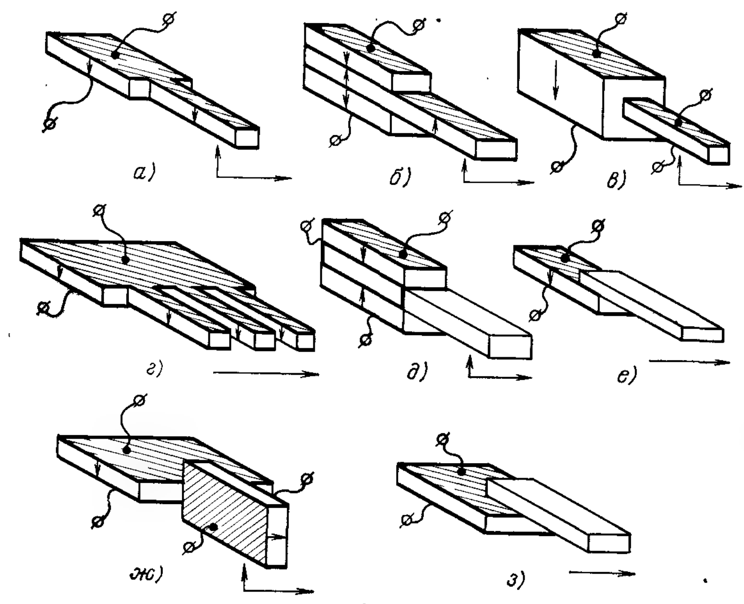


Рис. 41. Пьезоэлементы, выполненные в виде ступенчатых концентраторов скорости.

Стрелками показаны возможные положения оси ротора.

Радикальным способом уменьшения напряжения питания является выполнение пьезоэлемента многослойным с параллельным соединением слоев (рис. 40,*в*). Расчленение междуэлектродного промежутка уменьшает напряжение пропорционально числу слоев. Современная технология позволяет изготовлять керамические пьезоэлементы толщиной 0,1 мм, что обеспечивает снижение напряжения питания ПД в силовом режиме до 10 В.

Для уменьшения напряжения питания можно также рекомендовать пьезоэлементы, выполненные в виде ступенчатых концентратов скорости (рис. 41). Однако использование концентратов часто приводит к уменьшению площади контакта осциллятора с ротором и, следовательно, к уменьшению ресурса ПД. Поэтому их применение чаще всего оправдано для ПД мощностью менее 0,1 Вт. Так, например, концентратор, показанный на рис. 41,*е*, был использован в ПД часового механизма; его применение позволило снизить напряжение питания двигателя до 0,1 В.

При возбуждении поперечных колебаний зубья ступенчатых концентратов можно рассматривать как пластины, консольно (рис. 41,*а*—*е*, *з*) или шарнирно (рис. 41,*ж*) закрепленные относительно основания концентратора; поэтому согласовать номера мод их продольных и поперечных колебаний не представляет труда. Однако применение ступенчатых концентраторов для уменьшения напряжения питания ПД, работающих в силовых режимах (т. е. в режимах, близких к предельно допустимым), нецелесообразно, поскольку тот же эффект достигается при использовании более простых осцилляторов с многослойными пьезоэлементами. Определенные возможности представляет использование осцилляторов, выполненных в виде ступенчатых концентраторов, для РПД с управлением по частоте. Концентратор не только увеличивает колебательную скорость конца осциллятора, но и вызывает дополнительный сдвиг фаз колебательных скоростей в поперечном и продольном направлениях (до 180°). В результате в области резонанса фаза колебательных скоростей может изменяться в пределах от 0 до 360°, и, следовательно, в указанной области существуют две зоны с противоположными направлениями вращения.

Многие исследователи пытались уменьшить напряжение питания, используя осцилляторы в виде неступенчатых концентраторов механического напряжения [18]. Такие осцилляторы, концентрируя продольные колебания, рассеивают энергию поперечных колебаний. При этом значительно ухудшаются условия для формирования необходимых траекторий движения контактных точек. В результате снижается к. п. д. двигателей, уменьшается стабильность их работы и сужается полоса рабочих частот. Кроме того, значительно усложняется изготовление осцилляторов.

Глава четвертая

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

29. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА ПД ПРИ ПРОДОЛЬНЫХ И ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Эквивалеитная электрическая схема пьезоэлемеита, выполненного в виде бруска, в котором возбуждены продольные колебаиия (рис. 42,*а*), представляет собой шестиполюсиик, показанный на рис. 42,*б* [13]. Параметры бруска и его эквивалеитиой схемы определяются следующими формулами:

волновое сопротивлеиие

$$Z = ab\rho c;$$

емкостное сопротивление

$$X_{\text{эт}} = a/bl\varepsilon^T_{33}(1-k^2_{31});$$

коэффициент траисформации идеального трансформатора

$$n_\varphi = bY_1^E d_{31};$$

постоянная распространения

$$\gamma = \omega\sqrt{\rho/Y_1^E}.$$

Здесь ε^T_{33} — диэлектрическая постоянная материала; k_{31} — коэффициент электромеханической связи.

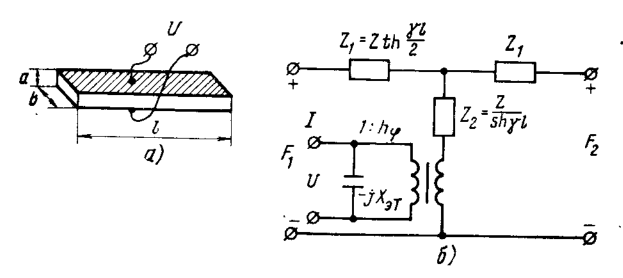


Рис. 42. Эквивалентная схема пьезоэлектрического бруска, в котором возбуждены продольные колебания.

Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического бруска с возбуждением колебаиий изгиба (рис. 43,а), полученная Ю. А. Шейко [29] (Киевский политехнический институт), представляет собой десятиполюсник со следующими параметрами (рис. 43,*б*):

$$Z_1 = \frac{jZ_0}{k^2}\,\frac{(\operatorname{ch} kl - \cos kl)(\cos kl - \operatorname{ch} kl - \operatorname{sh} kl \sin kl)}{(\operatorname{ch} kl \cos kl - 1)(\operatorname{sh} kl + \sin kl)};$$

$$Z_2 = \frac{jZ_0}{k^2}\,\frac{(\operatorname{ch} kl - \cos kl)^2}{(\operatorname{ch} kl \cos kl - 1)(\operatorname{sh} kl + \sin kl)};$$

$$Z_3 = \frac{jZ_0}{k^2}\,\frac{(\operatorname{ch} kl - \cos kl)(\sin kl - \operatorname{sh} kl)}{\operatorname{sh} kl + \sin kl};$$

$$Z_4 = \frac{jZ_0}{k^2}\,\frac{2}{\operatorname{sh} kl + \sin kl};$$

$$Z_5 = \frac{jZ_0}{k^2}\,\frac{\operatorname{ch} kl + \cos kl - 2}{\operatorname{sh} kl + \sin kl};$$

$$N_1 = \frac{1}{k}\,\frac{\operatorname{ch} kl - \cos kl}{\operatorname{sh} kl + \sin kl}; \quad N = \frac{abd_{31}}{2s^E_{11}};$$

$$C_0 = 4\varepsilon^S_{33}\,bl/a; \quad Z_0 = \frac{k^3a^3b}{12s^E_{11}\omega} = \rho abc_{\text{изг}};$$

$$k = \frac{\omega}{c_{\text{изг}}}; \quad c_{\text{изг}} = \sqrt[4]{\frac{a^2\omega^2}{12\rho s^E_{11}}}.$$

Здесь Z_0 — характеристическое механическое сопротивление изгибу; k — волиовое число; s^E_{11} — компонента податливости при постоянном поле; ε^S_{33} — диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации S; $c_{\text{изг}}$ — скорость распространения волны изгибных деформаций; C_0 — электрическая емкость зажатого стержня. На рис. 43, 44 Ω_1, Ω_2 — скорости поворота концов стержня; v_1, v_2 — поперечные скорости концов стержня.

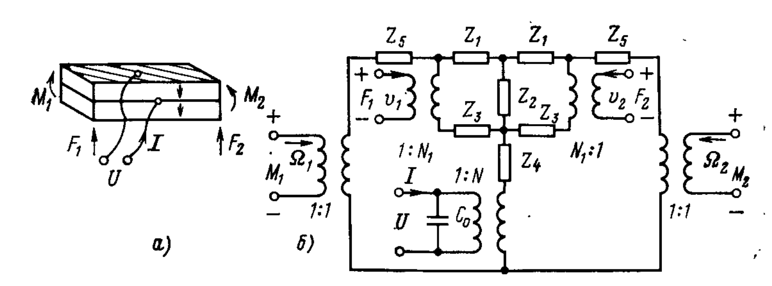


Рис. 43. Эквивалентная схема пьезоэлектрического бруска, в котором возбуждены колебания изгиба.

Схема получена для свободной биморфной пластины в предположении, что ее выводы подключены к источнику напряжения U и на концах пластины действуют поперечные силы F_1 и F_2, а также моменты сил M_1 и M_2. Кроме того, предполагалось, что электрическое напряжение эквивалентно поперечной силе (моменту силы), а ток I соответствует поперечной скорости сечения v (скорости поворота поперечного сечения Ω). Было принято, что $\lambda_{\text{изг}} \geqslant 4b$, где $\lambda_{\text{изг}}$ — длина волны колебаний изгиба. На этом основании все механические напряжения, кроме T_{11}, были приняты равными нулю. Не-

смотря на то, что элементарный объем пьезоэлемента изменяет свою форму под действием поперечных сил и моментов сил, предполагалось, что электрическое поле направлено по толщине пьезоэлемента и в каждый момент времени одинаково по всему объему.

30. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ПД С ПАССИВНЫМ РОТОРОМ

Представим осциллятор в виде пьезоэлектрической пластины с электродами на боковых поверхностях. Эквивалентная схема такой пластины при возбуждении продольных колебаний была приведена на рис. 42,*б*.

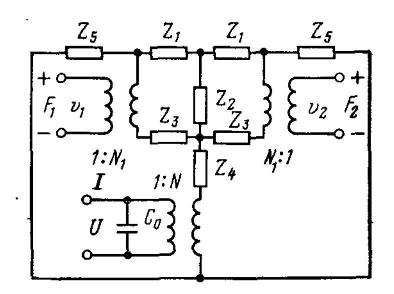


Рис. 44. Эквивалентная схема пьезоэлектрического бруска, в котором возбуждены колебания изгиба, при $M_1=M_2=0$.

Схема, соответствующая возбуждению изгибных колебаний, получается из схемы, показанной на рис. 43,*б* в предположении, что моменты M_1 и M_2 равны нулю (рис. 44). Для осциллятора с возбуждением только продольных колебаний пьезоэлектрическая активность по изгибу отсутствует и, следовательно, коэффициент трансформации N равен нулю.

Механизм передачи движения от статора к ротору соответствует модели, показанной на рис. 45,*а* [28]. Контактная площадка представлена телом *1*, на которое действуют тянущая сила статора $F_т$ и сила нормального давления (сила зацепления статора с ротором) $F_з$. Ротор представлен телом *2*, на которое действует сила нагрузки $F_н=M_н/R$, где $M_н$ — момент силы нагрузки, R — радиус ротора. Кроме того, в зоне контакта двух тел действует сила трения $F_{тр}$, равная произведению коэффициента трения на силу зацепления.

Построим зависимость скорости движения $v_т$ тела *1* относительно тела *2* от силы $F_т$ для различных значений силы зацепления $F_з$. Полагая, что сила трения не зависит от скорости, получим семейство кривых, показанное на рис. 45,*б*.

Поставив в соответствие силе $F_т$ электрическое напряжение u, а скорости $v_т$ — ток i, получим вольт-амперные характеристики (рис. 45,*в*) некоторого управляемого по напряжению нелинейного сопротивления (УНС). Входная характеристика УНС показана на рис. 45,*г*. Смещения тела *1* в направлении силы $F_з$ не происходит. Изменение знака этой силы приводит к отрыву тела *1* от тела *2*, что соответствует бесконечно большому току при массе (индуктивности) тела *1*, равной нулю.

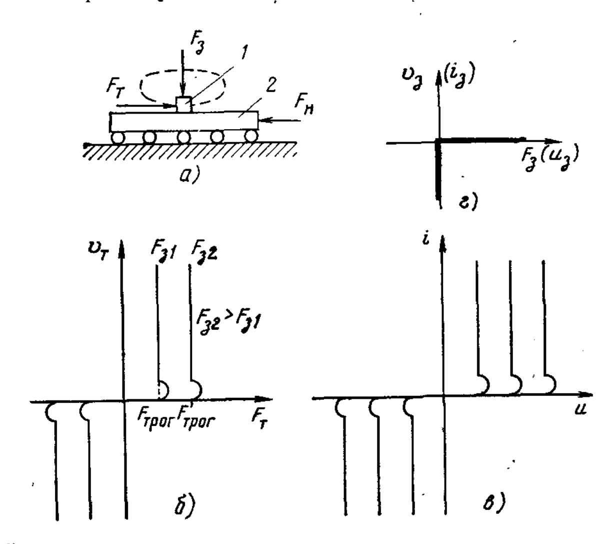


Рис. 45. Модель и характеристики механизма передачи движения от статора к ротору.
$F_{трог}$, $F'_{трог}$ — силы, соответствующие трогаиию тела *1*.

31. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ПД С УГЛОМ КОНТАКТА, РАВНЫМ НУЛЮ

Пьезоэлектрический двигатель с пассивным ротором. Рассмотрим двигатель, в котором тянущая сила обусловлена продольными колебаниями, а сила зацепления — колебаниями изгиба (рис. 46,*а*). Тянущая сила соответствует электрическому напряжению на одной из механических сторон эквивалентной схемы пьезоэлектрической

пластины (см. рис. 42,б). В случае, когда $F_т > F_{тр} > F_н$, тело 1 начинает двигаться с ускорением. При этом сила $F_т$ уравновешивается силой нагрузки и инерционной силой $F_т = F_н + F_{ин}$.

Следовательно, тянущая сила (напряжение) обусловливает движение (ток), причем скорости тела 1 и прокладки 2 равны. Таким образом, токи на механической стороне шестиполюсника и в нагрузке одинаковы, что соответствует присоединению нагрузки к выходным зажимам А, В эквивалентной схемы (рис. 46,б). Нагрузка при этом включает в себя индуктивность, эквивалентную массе ротора.

Допустим, что сопротивление нагрузки бесконечно велико (ротор зажат) и $F_т > F_{тр}$. Для такого режима механическая сторона эквивалентной схемы нагружена на сопротивление трения, т. е. на *УНС*. Указанное сопротивление подключается параллельно сопротивлению нагрузки. Управление этим сопротивлением осуществляется поперечной силой на конце осциллятора. Следовательно, механическая сторона эквивалентной схемы бруска, в котором возбуждены изгибные колебания (см. рис. 44), должна быть подключена ко входу *УНС*.

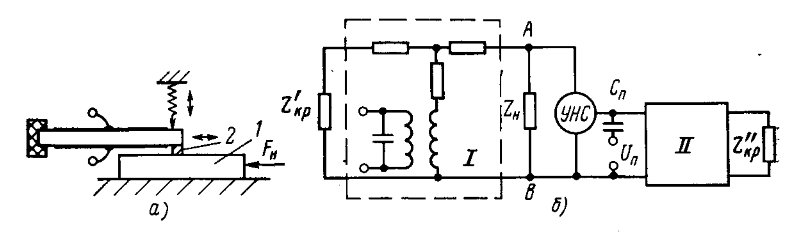


Рис. 46. Конструкция и эквивалентная схема ПД с углом контакта, равным нулю.

I и II — эквивалентные схемы осцилляторов, в которых возбуждены продольные и изгибные колебания; $Z'_{кр}$ и $Z''_{кр}$ — полные сопротивления потерь, связанных с креплением осцилляторов; $Z_н$ — сопротивление нагрузки.

При постоянной силе прижима осциллятора к статору эквивалентная схема содержит источник постоянного напряжения $U_п$, соответствующего указанной силе, и емкость $C_п$, эквивалентную податливости пружины. В общем случае эта емкость заменяется комплексным сопротивлением, учитывающим массу и потери в пружине.

Пьезоэлектрический двигатель с активными ротором и статором. В ПД с активными ротором и статором сила зацепления возбуждается в роторе; поэтому УНС следует представлять в виде четырехполюсника. Вместо эквивалентной схемы осциллятора с возбуждением колебаний изгиба принимается схема осциллятора, в котором возбуждены радиальные колебания. В остальном эквивалентная схема ПД с активными ротором и статором аналогична рассмотренной выше схеме с пассивным ротором.

32. ТРАНСФОРМАТОР НАПРАВЛЕНИЙ СИЛ

Первая модель. Рассмотрим систему трех сил $F_з$, F_0, F'_0, приложенных в одной точке (рис. 47,а). Условия их равновесия имеют вид:

$$F_з = \frac{F_0}{\sin\alpha}; \quad F'_0 = \frac{F_0}{\operatorname{tg}\alpha}.$$

Если каждой из сил поставить в соответствие электрическое напряжение, то эквивалентом указанной системы будет идеальный трансформатор (рис. 47,б). Для того чтобы проверить условие равновесия системы, сведем все напряжения к одному входу (рис. 47,в).

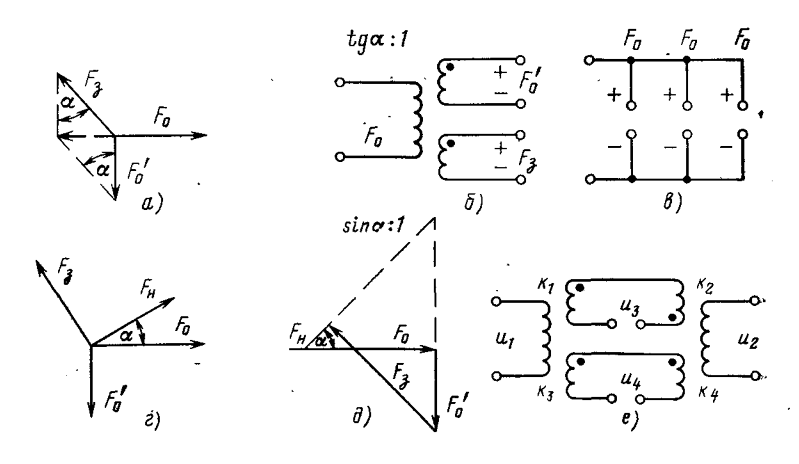


Рис. 47. Системы сил, приложенных к одной точке, и их электрические эквиваленты.

В результате получим три параллельно соединенных источника одинакового напряжения, равновесие которых (отсутствие тока) очевидно. Если отключить от трансформатора два напряжения, например F'_0 и $F_з$, то напряжение F_0 на входе трансформатора будет индуцировать на его выходах напряжения F'_0 и $F_з$, что эквивалентно разложению силы F_0 на две составляющие.

Вторая модель. Рассмотрим систему четырех сил, приложенных в одной точке (рис. 47,*г*). Если в такой системе в уравновешенном состоянии независимой является одна сила (например, F_0), то этой силе соответствует бесконечное множество значений сил по заданным направлениям. Следовательно, систему четырех сил нельзя представить в виде одного идеального трансформатора, коэффициенты трансформации которого зависят только от направлений сил. По той же причине нельзя однозначно разложить одну силу по трем направлениям, расположенным в одной плоскости. Естественно, что невозможно осуществить и соответствующую электрическую аналогию.

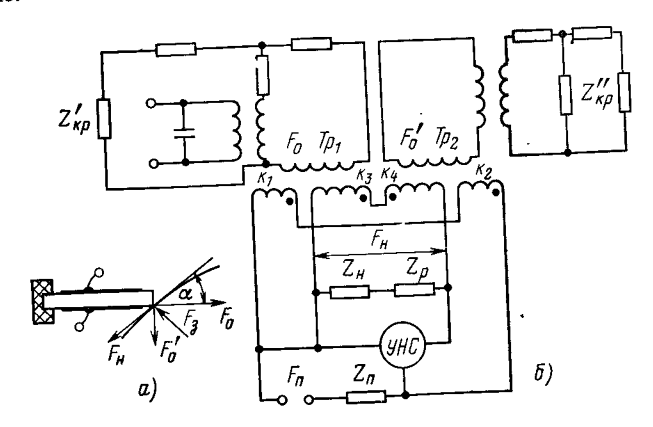


Рис. 48. Эквивалентная схема ПД с углом контакта. не равным 0 и 90°.

Допустим, что приложены две независимые силы, например, F_0 и F'_0 (рис. 47,*д*). Две другие силы $F_з$ и $F_н$, определяемые соотношениями

$$F_з = F_0 \sin\alpha + F'_0 \operatorname{tg}\alpha \sin\alpha;$$

$$F_н = F_0 \cos\alpha - F'_0 \cos\alpha/\operatorname{tg}\alpha,$$

уравновешивают силы F_0 и F'_0 или являются реакциями опор или нагрузки.

Поставив в соответствие силам электрические напряжения, получим:

$$u_з = k_1 u_1 + k_2 u_2;$$

$$u_н = u_4 = k_3 u_1 + k_4 u_2.$$

Этим соотношениям соответствует схема, показанная на рис. 47,*е*, где $k_1 = 1/\sin\alpha$; $k_2 = 1/\operatorname{tg}\alpha \sin\alpha$; $k_3 = 1/\cos\alpha$; $k_4 = \operatorname{tg}\alpha/\cos\alpha$.

Рассмотрим теперь эквивалентную схему ПД с углом контакта, не равным 0 и 90°. Предположим, что осциллятор выполнен в виде прямоугольной пластины, в которой возбуждены продольные волны (рис. 48,*а*). Для равновесия необходимо, чтобы равнодействующая сил F_0, F'_0, $F_н$ и $F_з$ была равна нулю.

Электрическим эквивалентом такой системы сил, как было показано выше, являются два идеальных трансформатора $Тр_1$ и $Тр_2$

(рис. 48,*б*). При построении эквивалентной схемы ПД к обмоткам трансформаторов следует присоединить эквивалентные многополюсники осцилляторов продольных и изгибных колебаний, комплексные сопротивления нагрузки и ротора $Z_н$ и $Z_р$, а также УНС. На второй механической стороне каждого многополюсника необходимо включить комплексное сопротивление потерь на крепление ($Z'_{кр}$; $Z''_{кр}$). На входе УНС включают источник напряжения, эквивалентного силе прижима $F_п$, и комплексное сопротивление прижима $Z_п$.

Описанные принципы могут быть использованы при построении эквивалентных схем любых конструкций ПД, в которых происходит взаимодействие двух взаимно перпендикулярных колебаний.

Глава пятая

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ ПИТАНИЕ. ПРИМЕНЕНИЕ ПД

33. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПД

Измерение момента и скорости вращения. По сравнению с электромагнитными микродвигателями ПД развивают большие моменты на валу. Поэтому выпускаемые промышленностью моментометры не пригодны для измерения моментов на валу ПД. Авторами был разработан прибор (рис. 49) для измерения моментов от 0,1 до 100 Н·см, содержащий диск из магнитомягкого железа *1*, к которому через фетровую прокладку прижимается алюминиевый диск *2*. На оси диска установлен груз *3* со стрелочным указателем момента *4*. За алюминиевым диском находится постоянный магнит *5*, который с помощью винтовой передачи *6* можно перемещать вдоль оси моментометра. Железный диск свободно перемещается вдоль оси и, притягиваясь к постоянному магниту, прижимается к алюминиевому диску с силой, которая тем больше, чем меньше расстояние между железным диском и магнитом. Перемещая магнит, можно в широких пределах изменять момент нагрузки на валу двигателя. Увеличивая этот момент и добиваясь остановки двигателя, определяют его предельный момент.

Для исследования ПД применяется стенд, который обеспечивает возможность установки ротора любой конструкции, а также возможность перемещения осциллятора и изменения угла его контакта с ротором. Предусмотрено устройство для регулирования и измерения силы прижима. Измерение частоты вращения на стенде про-

изводится с помощью бесконтактного импульсного датчика и цифрового частотомера.

Измерение электрических параметров. Схема измерения электрических параметров ПД показана на рис. 50. Вольтметр V_1 (типа С-50) предназначен для измерения напряжения на ПД. Вольтметр V_2 (типа В3-3) вместе с калиброванным сопротивлением R_1 служит для измерения тока двигателя.

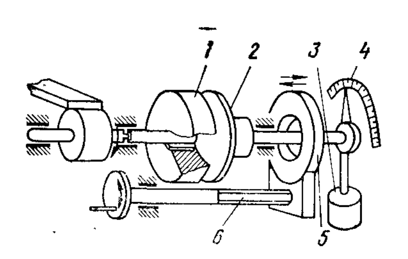


Рис. 49. Измеритель момента.

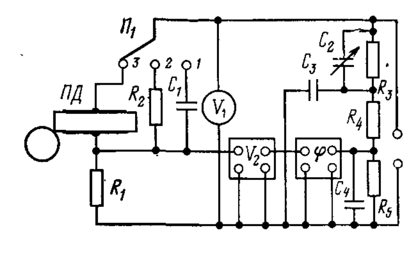


Рис. 50. Схема измерения электрических параметров ПД.

Сдвиг фаз между током и напряжением измеряют с помощью фазометра φ (типа Ф2-13). Правый на схеме вход фазометра подключения к цепи R_5C_4, R_4C_3, R_3C_2, с помощью которой осуществляются деление напряжения питания ПД и сдвиг его по фазе примерно на 90°. Угол сдвига регулируют с помощью переменного конденсатора C_2. Левый вход фазометра подключен к выходу вольтметра U_2; усилитель этого вольтметра изменяет фазу напряжения на 180°.

Напряжение на правом входе фазометра является опорным; его фазу устанавливают при калибровке схемы. Калибровку осуществляют следующим образом. На рабочей частоте ПД переключатель $П_1$ устанавливают в положение *2*, в результате чего вместо двигателя подключается калибровочное сопротивление R_2. При этом ток в измерительной схеме находится в фазе с напряжением, а общий сдвиг фаз, фиксируемый фазометром, равен 180°—90°=90°. С помощью конденсатора C_2 стрелку фазометра устанавливают на отметку 90°. После этого переключатель $П_1$ переводят в положение *1* и вместо сопротивления R_2 подключается эталонный конденсатор C_1. В результате сдвиг фаз оказывается равным 180°—90°—90°=0. Показание фазометра может быть отличным от нуля в том случае, если в схеме имеется нескомпенсированная реактивность, которая должна быть устранена.

Измерение параметров ПД производится в положении *3* переключателя $П_1$.

При использовании описанной методики погрешности измерения параметров ПД составляют: для момента на валу 2%, для скорости 0,1%, для напряжения питания 0,5%, для тока 2,5%, для сдвига фаз между током и напряжением 1%.

34. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ПД

В качестве источников питания ПД используют преобразователи постоянного напряжения в переменное напряжение ультразвуковой частоты. Преобразователи напряжения (ПН) можно классифицировать по схеме, показанной на рис. 51.

Преобразователи напряжения, в которых сигнал обратной связи снимается с осциллятора, следят за изменением его резонансной частоты. Эти преобразователи, применяемые для возбуждения пьезоэлектрических трансформаторов, описаны в [23, 30]. Рассмотрим особенности их выполнения при использовании для питания ПД. Отношение входного активного сопротивления к емкостному в двигателях с невыступающей прокладкой существенно выше, чем в трансформаторах. Поэтому для них используют преимущественно компенсирующую индуктивность, включенную последовательно со входом двигателя. В результате электромеханическая обратная связь значительно ослабляется, поскольку изменения индуктивности смещают баланс фаз по частоте и, следовательно, влияют на частоту ПД.

Изменение реактивного входного сопротивления ПД в течение одного оборота отслеживается генератором ПН. В результате частота генератора непрерывно изменяется в некоторой полосе, которая часто бывает шире полосы бесшумной работы двигателя. Эти особенности ПД ограничивают область применения ПН с электромеханической обратной связью. Обычно такие преобразователи используют для питания двигателей с выступающей прокладкой и в тех случаях, когда требования к мощности на валу и к к. п. д. являются второстепенными (например, в часовых двигателях, проигрывателях).

Преобразователи напряжения с электромеханической обратной связью могут быть выполнены в двух вариантах. Наиболее широко известны преобразователи с трансформаторной обратной связью. Для их применения осциллятор должен иметь один (рис. 52,*а*, *б*) или два (рис. 52,*в*) электрода обратной связи. Обычно в ПН с одним электродом обратной связи нагрузкой транзистора *Т* является активное линейное или нелинейное сопротивление, индуктивность (рис. 52,*а*), трансформатор или управляемый ключ на транзисторе другой проводимости [30]. В схеме, показанной на рис. 52,*б*, применено новое решение: между транзисторами T_1 и T_2 включена индуктивность *L*, равная 100—500 мкГн. Эта индуктивность запасает энергию при разряде емкости пьезоэлемента по цепи: пьезоэлемент — *L* — открытый транзистор T_2. После того, как указанный транзистор

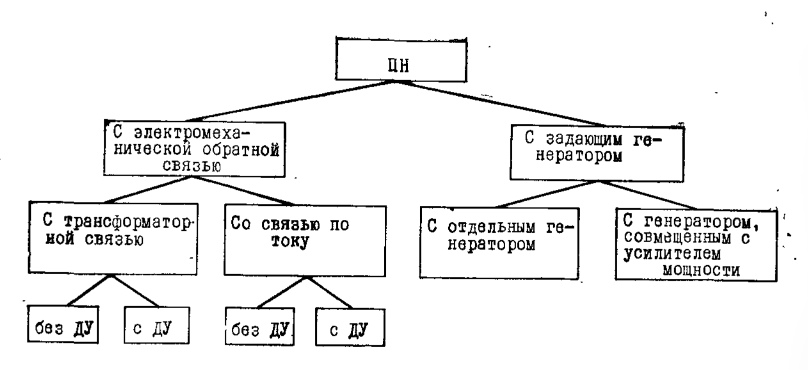


Рис. 51. Классификация преобразователей напряжения (*ДУ* — дополнительный усилитель мощности).

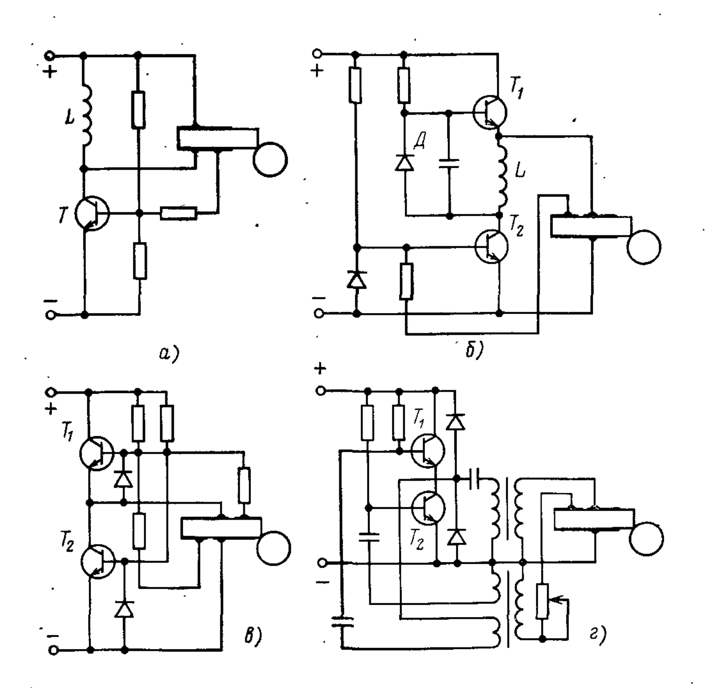


Рис. 52. Схемы ПН с электромеханической обратной связью.

закрывается, ток катушки L проходнт по цепи: диод *Д* — переход база — эмиттер транзнстора T_1; при этом транзнстор T_1 открывается. Управление двумя однотипными транзисторами осуществляется без согласующего трансформатора. В ПН с двумя электродамн обратной связи (рнс. 52,*в*) напряжение обратной связи попеременно включает и выключает транзисторы T_1 и T_2.

В рассмотренных выше преобразователях усилитель мощности является одновременно и усилителем тока в цепи обратной связи. Такое решение приемлемо для ПД с низким напряжением возбуждения. Для двигателей с напряжением возбуждения выше 10 В выходное сопротивление секций обратной связи не согласуется с входным сопротивлением усилителя мощности. В этих случаях используют дополненные согласующие элементы (рис. 52,*г*). Для согласования в цепях обратной связи наряду с электромагнитными применяют и пьезоэлектрические трансформаторы [23, 30].

В ПН с усилителем тока (рис. 53) новым является питание этого усилителя также и энергней, накопленной в катушке индуктивности. Такое решение позволяет повысить к. п. д. ПН, уменьшить его размеры н стонмость. Использование многослойных пьезоэлементов, а также двухслойных с различной толщнной слоев (см. рнс. 40,*в*) снимает вопросы согласования цепей ПН с двигателем.

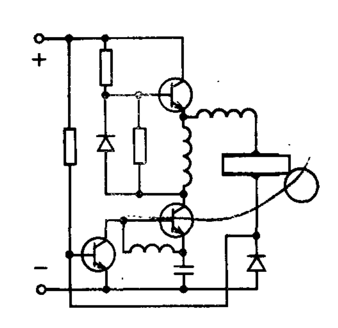


Рис. 53. Схема ПН с усилителем тока и индуктивным накоплением энергии.

Прн проектированни ПН с трансформаторной электромеханической обратной связью необходимо учитывать, что преобразователь может возбудиться на частоте паразитной моды колебаний. Для того чтобы возбудить осциллятор на необходнмой частоте, следует правильно рассчнтать его размеры, форму, площадь и расположение электродов обратной связн, а также использовать фильтры [23].

35. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ТОКУ

Эквивалентной схемой двухполюсного осциллятора является последовательно-параллельный контур $C_э$, $L_м$, $C_м$, $R_м$, $R_н$ (рис. 54,*а*). Сопротивление такого контура $R_к$ (рис. 54,*б*), а следовательно, и ток через осциллятор зависят от частоты.

Если в цепи обратной связи нет дополнительной реактивности, то баланс фаз наступает только на частотах резонанса $f_р$ и антирезонанса $f_а$, когда сопротивление осциллятора является активным. Если при этом условие баланса амплитуд выполняется только в окрестности частоты резонанса, то схема возбудится на частоте $f_р$ и будет следить за ее изменением.

Авторы предложили осуществлять возбуждение пьезоэлектрических устройств сигналом от электромеханической связи по току [31]. Это позволило, используя созданные в Киевском политехническом институте клю-

чевые усилители с индуктивным накоплением энергии, разработать простые схемы ПН (см. рис. 52,*б*, 53) с питанием от повышенного напряжения, в том числе и от сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц (рис. 55). В указанных преобразователях включение транзисторов осуществляется током самоиндукции. Транзистор

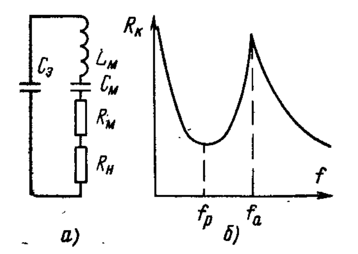


Рис. 54. Эквивалентная схема двухполюсного осциллятора (*а*) и его частотная характеристика (*б*):
$C_э$ — емкость пьезоэлемента; $L_м$, $C_м$, $R_м$ — индуктивность, емкость и сопротивление, эквивалентные соответствующим механическим параметрам пьезоэлемента; $R_н$ — сопротивление, эквивалентное его нагрузке.

(см. рис. 53) питается напряжением конденсатора *C*. Этот конденсатор подзаряжается разрядным током емкости пьезоэлемента ПД.

В преобразователе, схема которого показана на рис. 55, конденсаторы C_1, C_2 и катушки индуктивности L_1, L_2 образуют два низкодобротных последовательно

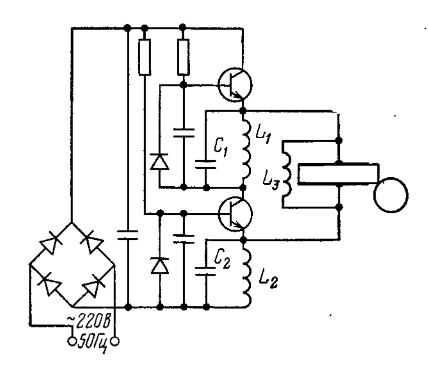


Рис. 55. Схема ПН с питанием от сети напряжением 220 В.

соединенных контура, имеющих активное сопротивление на рабочей частоте. Эти контуры исключают возбуждение колебаний паразитных мод.

Рассматриваемые преобразователи могут работать как с компенсирующей индуктивностью на входе ПД,

так и без нее. Компенсирующая индуктивность смещает баланс фаз по частоте и позволяет выбрать рабочую частоту в любой точке в окрестности резонанса осциллятора; кроме того, она обеспечивает косинус угла мощности, равный единице. Индуктивности малогабаритных дросселей L_1 — L_3 составляет до 0,5 мГн. Для питания ПД от низковольтного источника были разработаны схемы ПН, одна из которых показана рис. 56,а. В этой

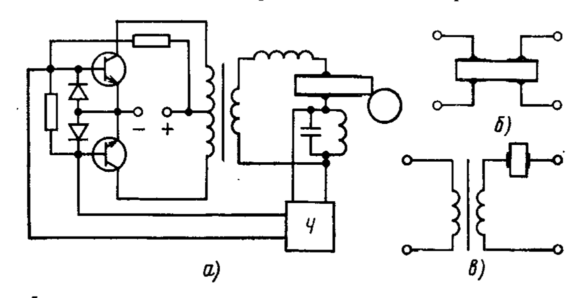


Рис. 56. Принципиальная схема ПН с обратной связью по току.

схеме четырехполюсника *Ч* представляет собой пьезоэлектрический трансформатор (рис. 56,*б*) или электромагнитный трансформатор и двухполюсный пьезоэлемент (рис. 56,*в*). В обоих случаях пьезоэлемент выполняет функции фильтра, задающего частоту генератора. Этот пьезоэлемент изготавливают из того же материала, что и пьезоэлемент осциллятора, и укрепляют на корпусе двигателя. В результате осуществляется отслеживание изменения частоты ПД при изменении температуры.

36. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С ЗАДАЮЩИМ ГЕНЕРАТОРОМ

В ПН с задающим генератором частотнозадающей цепью является последовательный колебательный контур *LC* (рис. 57,*а*) или двухполюсный пьезоэлемент *ПЭ* (рис. 57,*б*). Совмещение генератора с усилителем мощности значительно упрощает схему; однако при этом в частотозадающую цепь вносится некоторая переменная реактивность со стороны ПД. В результате возникают флуктуации частоты генератора, что ограничивает применение таких схем в устройствах с повышенными требованиями к стабильности мгновенной частоты вращения,

Электрическую связь ПД с задающим генератором можно уменьшить, включив между ними усилитель мощности. Этот усилитель может быть выполнен по двухтактной симметричной (рис. 58,*а*) или несимметричной полумостовой схеме (рис. 58,*б*). В полумостовой схеме транзистор T_1 рассеивает несколько бо́льшую мощность, чем транзистор T_2. Если предельно допусти-

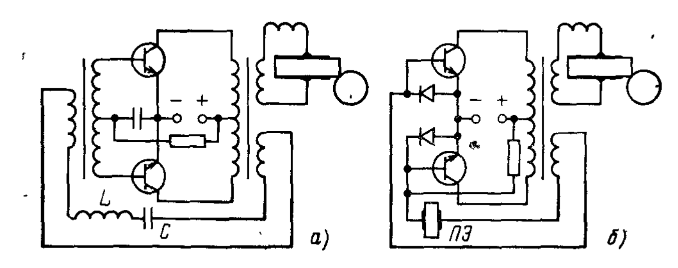


Рис. 57. Схемы ПН с задающим генератором.

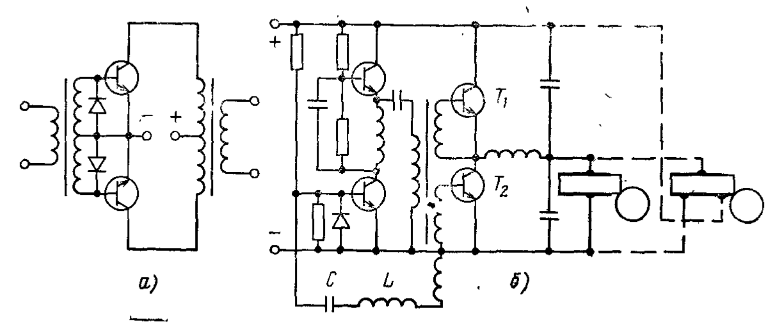


Рис. 58. Схемы ПН с усилителями мощности.

мая мощность транзистора T_1 недостаточна, то ПД включают так, как показано на рис. 58,*б* пунктиром. Такое включение делает усилитель мощности симметричным относительно источника питания.

В схемах с трансформаторным выходом усилителя мощности трансформаторы выполняют на ферритовых сердечниках типов 1000 НМ, 1500 НМ, 2000 НМ. Отношение чисел витков обычно выбирают не меньшим 15. Умножение напряжения примерно в 5 раз осуществляют с помощью последовательного контура *LC* (рис. 58,*б*).

Схемы с трансформаторным выходом обычно применяют в тех случаях, когда для питания использует-

ся напряжение постоянного тока, меньшее 12 В. Для напряжений выше 20 В применение таких схем ограничивается параметрами транзисторов, которые должны иметь рабочее напряжение между коллектором и эмиттером, превышающее 50 В. Поэтому для напряжений, больших 20 В, чаще используют полумостовые и мосто-

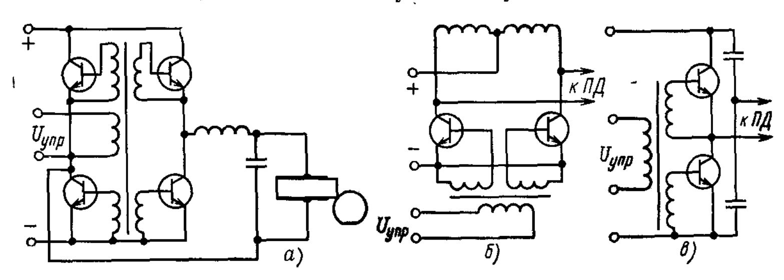


Рис. 59. Схемы мостовых усилителей мощности.

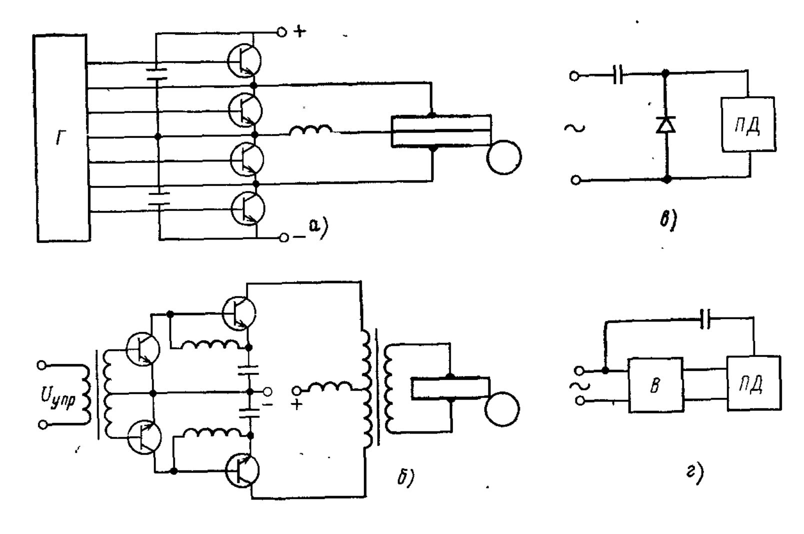


Рис. 60. Схемы ПН с усилителями мощности для специального применения (*Г* — генератор; *В* — выпрямитель).

вые схемы. Применение мостовых схем (рис. 59) обеспечивает удвоение напряжения на входе ПД, что удобно для бестрансформаторного включения двигателя.

Для ПН с питанием от сети напряжения 220 В была разработана схема с последовательным соединением

транзисторов (рис. 60,*а*). Эту схему используют в тех случаях, когда применение дорогостоящих высоковольтных транзисторов (типов КТ-809, КТ-704 и др.) нецелесообразно или не обеспечивает выполнение требований по к. п. д. Для расширения возможностей применения маломощных генераторов, собранных на интегральных схемах, был разработан двухкаскадный усилитель с большим коэффициентом усиления по мощности (рис. 60,*б*).

Если напряжение возбуждения, приходящееся на единицу толщины пьезоэлемента, превышает 50—100 В/мм, то необходимо соблюдать определенную полярность включения: направление постоянной составляющей напряжения ПН должно совпадать с направлением вектора поляризации. Если осциллятор изготовлен из материала с низкой температурой Кюри (ниже 150°С), то для исключения деполяризации необходимо иметь дополнительный поляризующий потенциал; его получают при помощи простейших выпрямителей *В*, включаемых на входе ПД (рис. 60,*в, г*).

37. ПРИМЕНЕНИЕ ПД

Кассетный магнитофон. Использование ПД в аппаратуре магнитной записи позволяет по-новому подойти к проектированию механизма транспортирования ленты (МТЛ). Это обусловлено возможностью получения больших крутящих моментов при сравнительно небольшом объеме двигателя.

В кассетном магнитофоне реализуются интегральные свойства ПД, отсутствующие у его аналогов. Под интегральными свойствами здесь понимается способность ПД вписаться в узлы МТЛ таким образом, что механизм частично выполняет функции двигателя: является его корпусом, содержит подшипники, элементы крепления, прижима, выводы.

На рис. 61,*а* показана кинематическая схема четырехдвигательного МТЛ. Двигатели боковых узлов *1* обеспечивают подмотку, подтормаживание и перемотку ленты *2;* по потребляемому ими току можно получить информацию о натяжении ленты, ее остановке или обрыве. Ведущие узлы *3* осуществляют движение ленты вперед и назад, обеспечивают ее постоянное натяжение в зоне магнитных головок и передают в систему автоматического регулирования информацию о детонации и средней скорости движения ленты. Высокие старт-стопные характеристики ПД позволяют вместо маховика использовать электронную систему стабилизации мгновенной скорости. Размеры МТЛ не превышают размеров футляра кассеты.

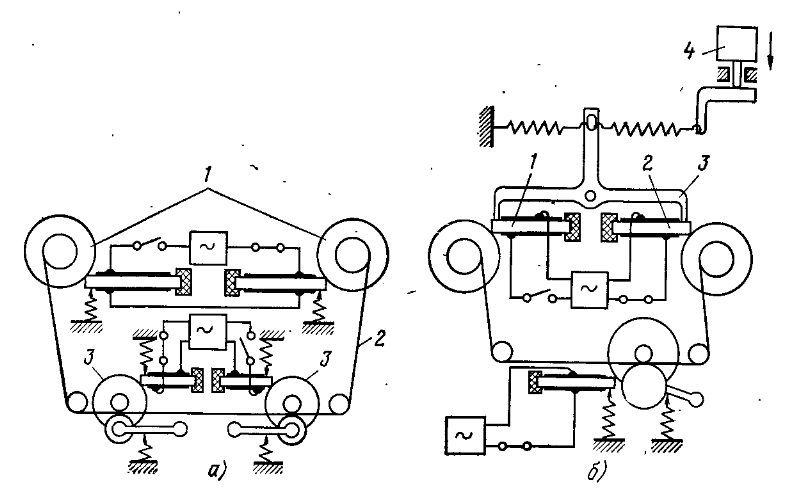


Рис. 61. Кинематические схемы МТЛ кассетного магнитофона.

Описанный механизм является перспективным; в настоящее время прорабатываются его отдельные узлы. Готовятся к серийному выпуску МТЛ с нереверсивными ПД и механической коммутацией прижима пьезоэлементов.

Кинематическая схема трехдвигательного МТЛ показана на рис. 61,*б*. Прижим одного из осцилляторов *1,2* к ротору осуществляется рычагом *3* при нажатии кнопки *4*. Сила прижима при записи и воспроизведении составляет 1 Н, при перемотке — 4 Н. Преобразователь напряжения собран по схеме с отдельным задающим генератором на транзисторах КТ312. Механизм имеет следующие технические характеристики: напряжение питания 12 В; потребляемая мощность 0,6 Вт при записи и воспроизведении и 1,5 Вт при перемотке; продолжительность перемотки для кассет МК-60 менее 1 мин; коэффициент детонации менее 0,3% для маховика массой 150 г; нестабильность средней скорости не более

2% (без применения электронного стабилизатора скорости).

В рассмотренных механизмах роторы ПД совмещены с ведущими валами. Для уменьшения массы маховика был разработан ПД с приводом ведущего вала через фрикционную связь (рис. 62). При том же коэффициенте детонации масса ведущего узла уменьшилась до 40 г.

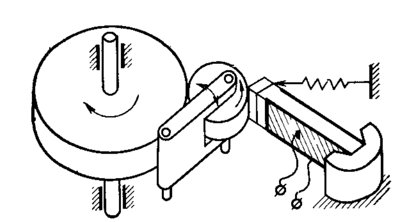


Рис. 62. Пьезоэлектрический двигатель с промежуточным ротором.

Кассетный диктофон. Для обеспечения высокой стабильности скорости вращения и момента роторы МТЛ должны быть изготовлены с высокой точностью; биение ротора не должно превышать 2 мкм. Высокая стоимость таких роторов при мелкосерийном производстве не позволяет использовать их в магнитофонах третьего класса и диктофонах. Поэтому были разработаны кассетные МТЛ с двух- и однодвигательным пьезоэлектрическим приводом.

Схема привода боковых узлов двухдвигательного МТЛ диктофона показана на рис. 63. Механизм содержит два пьезоэлемента; один из них прижимается к ротору при одном направлении движения ленты, другой — при противоположном. Кроме того, пьезоэлементы прижимают шкив к нужному узлу.

Однодвигательный МТЛ диктофона был разработан О. Л. Бойченко [32] (Киевский политехнический институт) на базе МТЛ магнитофона «Спутник». При этом был использован ПД с механическим реверсом (см. рис. 37,*а*, *б*). Диктофон имеет следующие технические характеристики: потребляемая мощность 2 Вт при записи и воспроизведении и не более 4 Вт при перемотке; продолжительность перемотки для кассет МК-60 не более 1 мин; коэффициент детонации менее 0,5% (при скорости 4,76 см/с); нестабильность средней скорости не более 2%.

Катушечный МТЛ для видеозаписи. К механизмам для катушечных аппаратов видеозаписи и воспроизведения предъявляются более жесткие требования, чем к механизмам катушечных магнитофонов. В соответствии с этими требованиями был разработан МТЛ на основе серийного видеомагнитофона «Электроника» Л1-08. Блок видеоголовок и ведущий узел приводились в движение непосредственно от осциллятора ПД. Схема привода боковых узлов показана на рис. 64,*а*. На рис. 64,*б* приведена фотография стандартного блока видеоголовок с установленным на ней пьезоэлектрическим двигателем и преобразователем напряжения. Ротором двигателя является стальной вал блока. В ПД были использованы осцилляторы с выступающими прокладками. Осцилляторы имели размеры 32×7×3,5 мм и 50×10××5 мм [20].

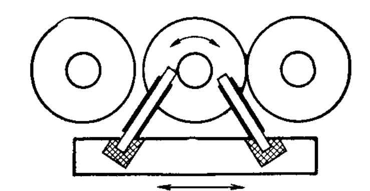
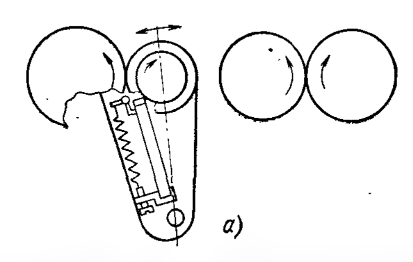


Рис. 63. Схема привода боковых узлов двухдвигательного МТЛ диктофона.

Испытания, которые проводились без использования систем стабилизации скорости, показали, что описанный МТЛ имеет следующие технические характеристики: потребляемая мощность 3 Вт при записи и воспроизведении и 6—8 Вт при перемотке; продолжительность перемотки 4 мин; коэффициент детонации не более 0,2%; нестабильность средней скорости ±3%; ресурс 1000 ч. В результате модернизации масса МТЛ уменьшилась на 800 г. При серийном производстве ожидается также заметное снижение стоимости узлов привода.

Проигрыватель грамзаписи. Характеристики ПД позволяют осуществить непосредственный привод диска проигрывателя путем установки на его валу ротора, к поверхности которого постоянно прижат осциллятор. Необходимая мощность на валу проигрывателя не превышает 0,2 Вт; поэтому ротор ПД может быть изготовлен как из металла, так и из пластмассы, например карболита. Для металлических роторов успешно используют органические прокладки.

Электропроигрывающее устройство имеет следующие характеристки: диаметр чугунного ротора 100 мм; масса диска 1,6 кг; продолжительность разгона 2 с; пусковой момент 7 Н·м; потребляемая мощность 1,5 Вт; коэффициент детонации и нестабильность средней скорости



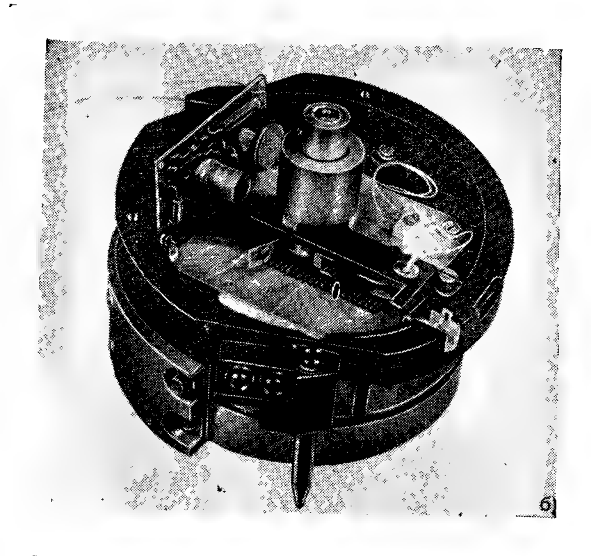


Рис. 64. Схема привода боковых узлов видеомагнитофона (*а*) и блок видеоголовок с установленным ПД (*б*).

не более 0,1%. В электропроигрывающем устройстве используется электронная система стабилизации средней и мгновенной частоты вращения с применением оптического датчика. Если привод вала проигрывателя осуществлять через промежуточный ротор (рис. 62), то максимальный коэффициент детонации при отсутствии

стабилизатора скорости составит 0,05%. Испытания макетов различных роторов показали, что возможно создание электропроигрывателей без применения инерционных масс.

Электробритва. Образец был изготовлен на базе электробритвы «Харьков-6М». Два ротора диаметром 8 мм были выполнены с твердосплавными оболочками из карбида титана. Их привод осуществлялся от одного или двух пьезоэлементов. В первом случае мощность на каждом валу составляла 2 Вт, во втором — 3 Вт, общая потребляемая мощность — 15 Вт. Питание электробритвы осуществлялось постоянным напряжением 9 В по схеме, показанной на рис. 57,*а*.

Часы. Образец был выполнен на базе механизма настольных часов «Слава». В стенках механизма были просверлены два отверстия, в которые была вставлена ось. В центре оси были подпаяны осциллятор (см. рис. 17,*е*) и бронзовый волосок, являющийся элементом прижима. Осциллятор одним концом опирался на стальной ротор, свободно насаженный на ось храпового колеса. Питание осциллятора осуществлялось по схеме, показанной на рис. 52,*в*, с использованием транзисторов КТ307. Напряжение питания 1,2 В; потребляемый ток 150 мкА. Малая потребляемая мощность ПД часовых механизмов позволяет питать их от фотоэлементов.

Шаговый двигатель. Отличные старт-стопные характеристики позволяют использовать ПД в качестве шагового двигателя. Для этого на его валу устанавливают датчик положения, например фотодатчик. При подаче напряжения питания ПД отрабатывает заданное угловое перемещение. После этого датчик выдает импульс, отключающий источник питания, и двигатель останавливается.

Образец ПД имеет следующие технические характеристики: время пуска 0,5 мс; время торможения 1 мс; частота вращения 10 — 20 c^{-1}; момент на валу 2 — — 4 Н·см; погрешность отработки угловых перемещений 0,2°; средняя и импульсная мощность 4 и 8 Вт; потребляемая мощность 12 Вт.

Питание двигателя осуществлялось по схеме, показанной на рис. 56,*а*.

Электроизмерительный прибор. Присоединение к ротору ПД стрелки и возвратной пружины позволяет использовать двигатель в качестве малогабаритного и де-

шевого электроизмерительного прибора с круговой шкалой (рис. 65). Для предотвращения заклинивания при отключении напряжения в осцилляторе возбуждают колебания двух типов. Возбуждение продольных и поперечных колебаний от одного или двух разных источников, а также выполнение двигателя с активным ротором и статором позволяют на основе рассмотренных принципов создавать приборы для измерения мощности, сдвига фаз и т. д. Если выполнить ротор в виде эксцентрика или придать его поверхности специальную форму, то

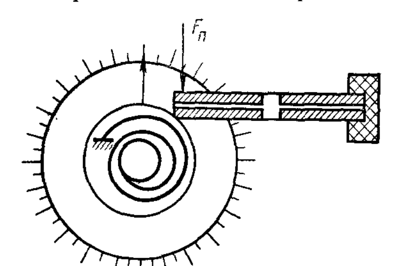


Рис. 65. Схема пьезоэлектрического измерительного прибора.

можно реализовать сложные функциональные зависимости, например, между напряжением возбуждения и частотой вращения или моментом на валу. При использовании эффекта заклинивания легко создать приборы для измерения импульсных напряжений с запоминанием и последующим сбросом путем возбуждения в осцилляторе колебаний изгиба. Применяя ПД, можно также сконструировать высокочастотные измерительные головки, предназначенные, например, для настройки радиоприемников.

Линейный двигатель. Первая конструкция линейного пьезоэлектрического двигателя (ЛПД) предназначалась для привода реле. В 1969 г. ЛПД был использован для привода носителя записи [33]. В СССР это направление получило дальнейшее развитие в [34 — 36]. Исследование ЛПД и возможностей их применения в качестве силовых приводов проводятся в Томском политехническом институте под руководством канд. техн. наук А. И. Трофимова.

В варианте ЛПД, показаном на рис. 66,*а*, осциллятор в результате электрического возбуждения колебаний одного типа вызывает однонаправленное движение якоря; его возврат осуществляется пружиной. ЛПД такой конструкции развивал силу до 50 Н. В качестве якоря была использована пластина из нержавеющей стали; осциллятор был выполнен в виде пластины размерами 100×10×10 мм из пьезокерамического материала ЦТС-19. Для уменьшения сил трения при возврате якоря в осцилляторе возбуждают колебания второго типа или выполняют якорь пьезоэлектрически активным и при возврате в нем возбуждают колебания. Рассмотренная система ЛПД эквивалентна системе привода якоря от вращающегося ролика.

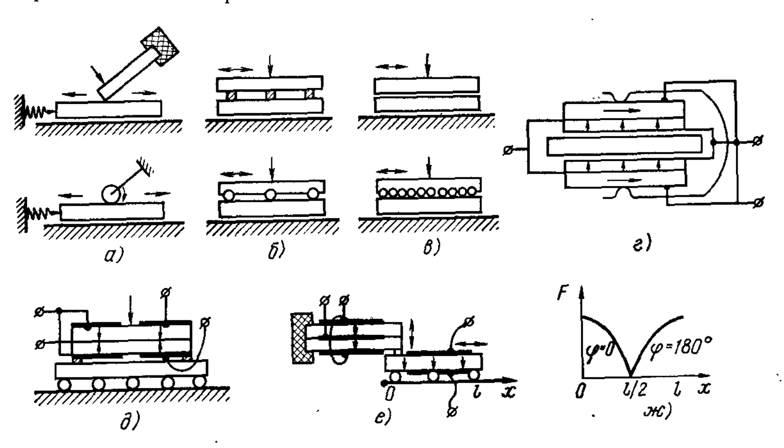


Рис. 66. Конструкции ЛПД.

Конструкция, эквивалентная приводу якоря от нескольких роликов, показана на рис. 66,*б*. Такая система получается при возбуждении колебаний двух типов по длине осциллятора или при возбуждении колебаний одного типа в осцилляторе статора, а другого типа — в осцилляторе якоря. Рассматриваемый ЛПД обеспечивает возвратно-поступательное движение якоря. Пример выполнения такого двигателя показан на рис. 66,*д*. В осцилляторе статора возбуждают продольные колебания первой моды и изгиба второй моды. Изменение фазы напряжения питания на 180°, например, секций продольных колебаний обеспечивает возвратное движение якоря.

Система, эквивалентная приводу якоря от бесконечного числа роликов, показана на рис. 66,*в*. Она обычно реализуется при возбуждении одновременно продольных и поперечных колебаний по длине прямоугольного ос-

циллятора (рис. 66,*г*, *д*) или при возбуждении колебаний одного типа в осцилляторе статора, а другого типа — в осцилляторе якоря.

В ЛПД с активным якорем можно управлять законом изменения силы при изменении положения якоря. Например, если в осцилляторе якоря (рис. 66,*е*) возбуждать продольные колебания по длине, а в осцилляторе

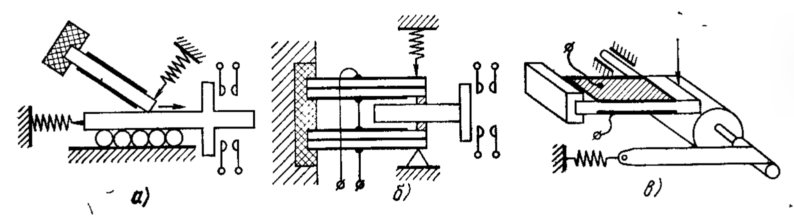


Рис. 67. Схемы пьезоэлектрических реле (*а*, *б*) и линейного приводного механизма (*в*).

статора изгибные колебания (или наоборот), то зависимость силы F от координаты якоря x имеет вид, показанный на рис. 66,*ж*. Вторая ветвь кривой получена при сдвиге на 180° фазы напряжения, питающего осциллятор статора. На основе ЛПД можно изготовлять пьезоэлектрические реле с потребляемой мощностью от нескольких десятков микроватт до нескольких ватт. Такие реле в рабочем состоянии не потребляют энергии. После срабатывания сила трения надежно удерживает контакты в замкнутом положении. Включение переменного поля, возбуждающего колебания, снимает силу трения, а в некоторых конструкциях возвращает контакты в исходное состояние (рис. 67,*а*).

В реле, показанном на рис. 67, *б*, осциллятор состоит из двух биморфных пьезоэлементов; часть каждого из них служит для возбуждения продольных колебаний, а другая часть—для возбуждения колебаний изгиба. Перемещение якоря осуществляется в результате дискретного изменения частоты.

Для обеспечения больших усилий (20—100 Н) был выполнен линейный привод на базе ПД с вращающимся ротором (рис. 67, *в*). В этой конструкции стальная лента толщиной 0,05 мм наматывается на вал ротора. Если на поверхности ротора сделать гладкие углубления, можно получить двигатель с фиксацией углового положения.

Линейные ПД используют также для привода прижимного ролика катушечного магнитофона [37]. Схема пьезоэлектрического привода прижимного ролика кассетного магнитофона показана на рис. 68, *а*. Осциллятор *1* имеет две пары обкладок, одна из которых *2* при включении напряжения $U_{упр1}$ возбуждает продольные колебания сравнительно большой мощности. Эти колеба-

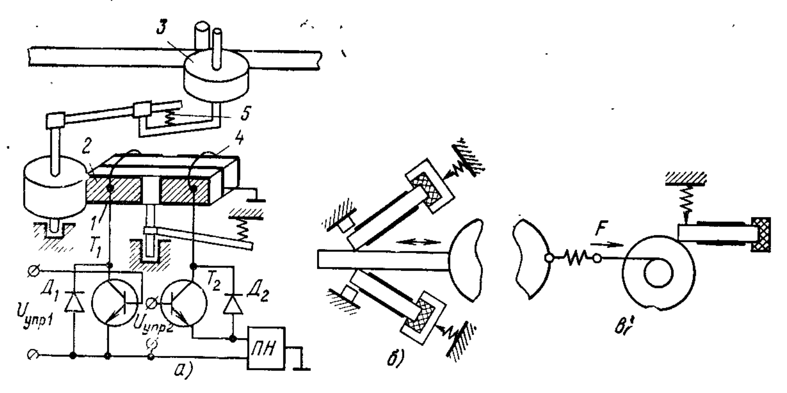


Рис. 68. Схемы привода прижимного ролика (*а*) и каретки (*б*, *в*) кассетного магнитофона.

ния обеспечивают прижим ролика *3* при записи и воспроизведении. После отключения напряжения осциллятор удерживает ротор за счет заклинивания до появления импульса сброса. Этот импульс после включения напряжения $U_{упр2}$ подается во вторую пару обкладок *4*, которые возбуждают колебания изгиба, расклинивающие осциллятор. В результате пружина *5* возвращает ролик в исходное состояние.

Возбуждение осциллятора осуществляется от ПН привода боковых узлов магнитофона. Коммутация обкладок обеспечивается с помощью транзисторов T_1 и T_2 (КТ605Б), зашунтированных по цепи коллектор—эмиттер диодами $Д_1$ и $Д_2$ (2Д102А). Прижим осуществляется в течение 0,2 с; сила прижима 20 Н; потребляемая импульсная мощность 5 Вт.

Привод каретки кассетного магнитофона был выполнен в двух вариантах. В первом из них (рис. 68, *б*) два осциллятора при возбуждении продольных колебаний обеспечивают рабочий ход каретки; сила прижима составляет 4 Н. Во втором варианте (рис. 68, *в*) в резуль-

тате продольных колебаний осциллятора на ось ротора накручивается тонкая металлическая лента. Развиваемая сила может достигать 20 Н. В обоих случаях возбуждение изгибных колебаний приводит к возврату каретки в исходное положение. Эти колебания возбуждают на частоте, отличной от частоты продольных колебаний. Поэтому коммутация осуществляется путем изменения частоты задающего генератора. Так же как и в МТЛ кассетного аппарата, в осцилляторе привода каретки возбуждались изгибные колебания третьей моды. Осциллятор имел размеры 19×5×1,9 мм и был изготовлен из пьезокерамики ПКД-124Т.

Линейные пьезоэлектрические приводы имеют значительно меньшие размеры, чем электромагниты. Требуемый от них суммарный ресурс составляет десятки часов. Поэтому конструкции ротора и пьезоэлемента значительно упрощаются. Якоря выполняют сплошными из стали, чугуна или других дешевых материалов с достаточно большими допусками. Осцилляторы устанавливают без износостойких прокладок. В источниках питания приводов применяют, как правило, электромеханическую обратную связь и используют минимальное число деталей.

Это позволяет линейным приводам не только по параметрам, но и по стоимости конкурировать с применяемыми в настоящее время электромагнитами.

Низкооборотные ПД. Конструктивные особенности ПД позволяют создавать низкооборотные двигатели без использования редукторов. На рис. 69 приведена фотография нескольких лабораторных образцов таких двигателей. Частота вращения ротора этих двигателей лежит в пределах от долей до нескольких оборотов в минуту, момент на валу достигает 10 Нм, а к. п. д.—40%.

На рис. 70 показаны испытания мощного низкооборотного ПД. По конструкции этот двигатель относится к ПД с активным статором. Его осциллятор выполнен в виде пьезоэлектрического кольца, изготовленного из пьезокерамики ТБК-3. Рабочая частота двигателя 60 кГц.

Привод кассеты киноаппарата. Вес электрических двигателей и механизмов привода составляет основную часть веса киноаппаратов. Кинематическая схема киноаппаратов обычно строится таким образом, что один мощный электрический двигатель приводит в движение все его механизмы. Такое построение кинематической

схемы обусловлено тем, что в настоящее время отсутствуют электромагнитные двигатели, способные обеспечить работу каждого механизма киноаппарата отдельно от другого. Недостатками такой кинематической схемы являются ее сложность, низкая надежность, большая масса киноаппарата и габаритные размеры. Пьезоэлектрический двигатель позволяет приводить каждый узел киноаппарата от своего двигателя, что устраняет перечисленные недостатки.

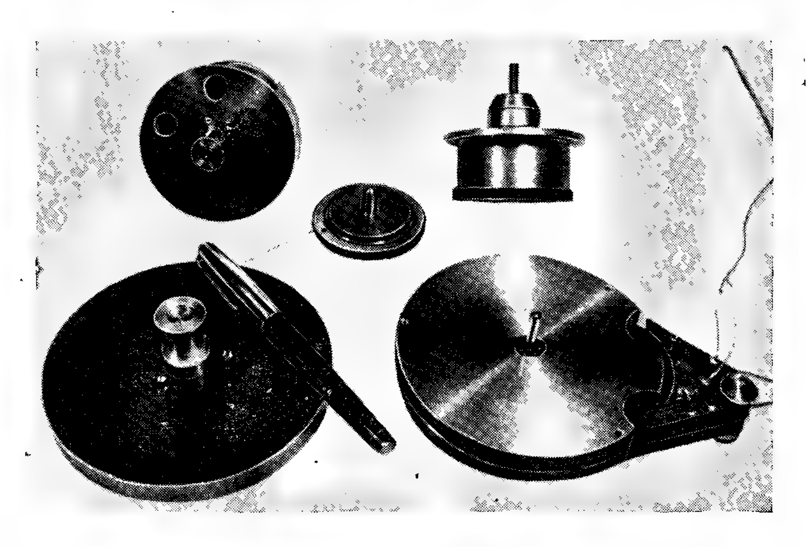


Рис. 69. Низкооборотные ПД.

На рис. 71 показана 300-метровая кассета 36-миллиметровой киноленты с установленным на ней ПД (двигатель показан стрелкой). Технические данные его следующие: частота вращения 10—200 мин$^{-1}$; момент на валу 0,2 Н·м; напряжение питания 40 В; частота напряжения питания 70 кГц; потребляемая мощность 2,5 Вт; масса 150 г.

Испытания кассеты совместно с киноаппаратом «Родина» показали перспективность применения ПД в качестве приводных узлов киноаппаратуры.

Пьезогенератор. Можно предположить, что ПД, основанный на анизотропии трения, должен обладать свойством необратимости, т. е. он не должен работать в режи-

ме генератора электрического напряжения. В отличие от него ПД с возбуждением двух взаимно ортогональных колебаний должен быть обратимой системой. Исследования нереверсивных ПД в режиме генератора подтвердили их обратимость. Однако электрический сигнал уда-

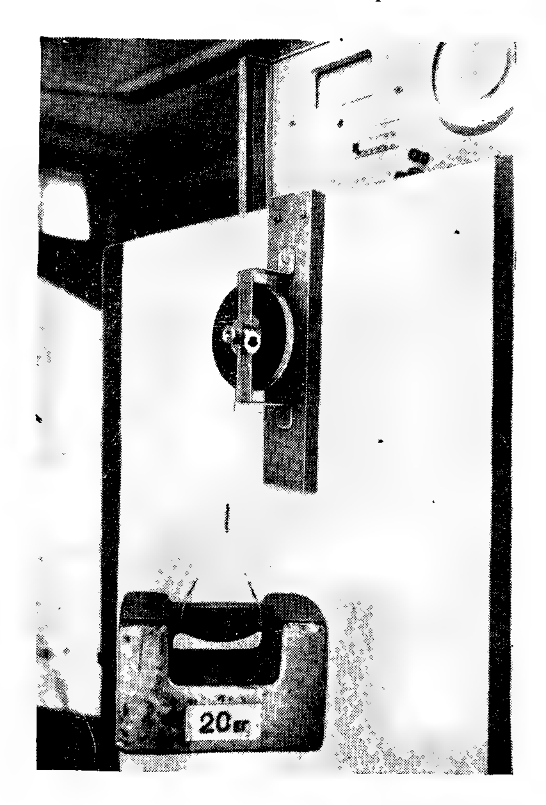


Рис. 70. **Испытания мощного низкооборотного ПД.**

валось получить только на некоторых дискретных частотах, причем мощность и к. п. д. генератора были недостаточны для практического применения. Испытания в режиме генератора реверсивных ПД привели к обнадеживающим результатам.

При исследовании ПД, работающего в режиме генератора, на один из входов осциллятора подают напряжение для возбуждения колебаний определенного типа

(обычно изгиба). Выходной электрический сигнал снимают с обкладок осциллятора, предназначенных для возбуждения колебаний другого типа (обычно продольных). Для того чтобы получить полезную электрическую мощность, равную 1,4 Вт, приходится затрачивать механическую мощность, равную примерно 5 Вт, и электри-

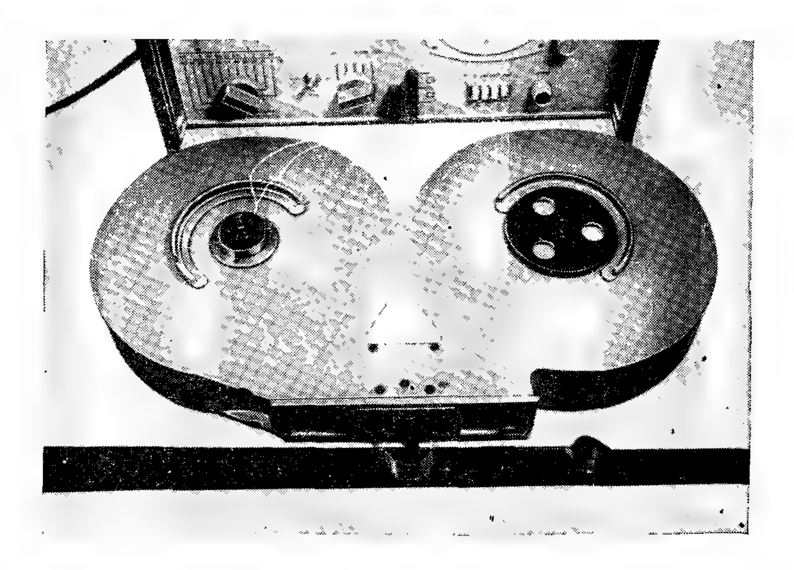


Рис. 71. **300-метровая кассета киноленты с установленным на ней ПД.**

ческую 1,2 Вт. Эти результаты подтверждают возможность создания пьезоэлектрического генератора. Такие генераторы могут найти применение в качестве источников напряжения и датчиков скорости.

Рассмотренные примеры не исчерпывают все возможности использования ПД. Эти двигатели могут найти широкое применение также в различных автоматах, роботах, протезах, детских игрушках и в других устройствах.

Изучение ПД только началось, поэтому не все их возможности раскрыты, а предельные параметры еще не достигнуты. Предельная мощность ПД принципиально не ограничена, однако конкурентоспособность с электродвигателями других типов ограничивает область их при-

Таблица 4

Сравнительные характеристики некоторых электромагнитных и пьезоэлектрических двигателей

Тип или назначение двигателя	Напряжение питания, В	Частота вращения, мин⁻¹	Момент на валу, Н·см	Мощность на валу, Вт	Удельная мощность, Вт/кг	К. п. д., %
Электромагнитные двигатели						
ДРВ-02	4	4000	0,05	0,2	2,7	12,5
ДПМ-20-Н1/Н2-08	27	4500	0,10	0,4	9	21
МУТ-5А*	13,2	2000	0,35	0,7	—	20
ДПМ-20-Н1/Н2-07	27	6000	0,20	1,2	19	30
KCN 26*	12	5000	0,70	3,5	—	25
ДПР-62-Н1/Н2-04	27	2500	2,00	5	12,5	57
KCN-52*	12	3000	3,30	10	—	28
КД-6-4	220	1400	4,00	6	6	31
MKL-10C*	16	300	2,00	0,6	—	35
SSW-116*	125	130	350	45	15	60
Пьезоэлектрические двигатели						
Широкого назначения	150	600	7,00	3	1,5	30
	125	900	6,00	3,5	123	56
	400	900	25,00	9	96	40
Шаговый	200	1200	5,00	4	80	40
Для привода боковых узлов магнитофона	200	600	8,00	2,5	—	30
Для привода ведущего вала магнитофона	60	240	2,50	0,5	—	25
Реверсивный	200	60—80	2—6	0,4	—	12
			2—3	0,2		15

Примечание. Звездочкой отмечены двигатели, изготовляемые японскими фирмами.

менения по мощности. В настоящее время это ограничение составляет примерно 10 Вт; оно связано не только с конструктивными особенностями ПД, но и с уровнем развития науки и техники, в частности с совершенствованием пьезокерамических, сверхтвердых и износостойких материалов. Следует также отметить, что ПД хорошо соответствуют развитию электронной техники, микроминиатюризации электронной аппаратуры, повышению ее надежности и качества, увеличению функциональных возможностей, снижению стоимости. Двигатели хорошо вписываются в различные механизмы и в равной мере удобны для крупно- и мелкосерийного производства. Ряд их уникальных свойств, описанных в книге, исключают многие проблемы, возникающие при проектировании аппаратуры. Эти свойства позволяют во многих случаях изменить принцип проектирования аппаратуры — отказаться от приводных передач и расчленить механический привод на ряд маломощных двигателей, расположенных непосредственно на функциональных узлах механизма.

Технические характеристики некоторых электромагнитных и пьезоэлектрических двигателей приведены в табл. 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пат. № 2439499 (США).** Williams A. and Brown W. Piezoelectric Motor. 1948.

2. **К динамике** вибрационных конвейеров с упругой поверхностью лотка при учете взаимодействия с технологической средой/ Потураев В. Н., Червоненко Л. Г., Хабло Г. П., Равишин В. Н. Вибротехника, 1973, № 3/20, с. 39—45.

3. **Архангельский М. Е.** О превращении ультразвуковых колебаний поверхности во вращательное и поступательное движение тела. — Акустический журнал, 1963, т. 9, № 2, с. 275—278.

4. **Пат. № 3343010 (США).** Snaper A. A. Ultrasonic Power Apparatus. 1967.

5. **Кэди У.** Пьезоэлектричество и его практическое применение. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.

6. **Пат. № 3176167 (США).** Vosseler G. Quartz Oscillator and Drive System, 1965.

7. **Пат. № 3211931 (США).** Tehon S. W. Electromechanical transducer motors. 1965.

8. **Пат. № 124371 (ФРГ).** Ceppi G. Oszillator für Uhren. 1967.

9. **Пат. № 3433009 (США).** Haag A. Clockwork with torsional or flexible oscillator. 1969.

10. **Пат. № 1906947 (ФРГ).** Gottfried A. Elektrischer Motor vom Typ mit einem elektrisch antreibbaren Biegeschwinger, welcher Schwinger mittels einer federnden Antriebsklinke mit einem Sägezahnrad zusammenarbeitet, 1970.

11. **Пат. № 3192415 (США).** Duff Etal J. E. Synchronous motor with self-set limit control. 1965.

12. **Пат. № 4019073 (США).** Piezoelectric motor structures. V. S. Vishnevcky, V. L. Kavertsev, I. A. Kartashev, V. V. Lavrinenko, M. M. Nekrasov, A. A. Pres. 1977.

13. **Магнитные** и диэлектрические приборы. Ч. I. Под ред. Г. В. Каца. М.: Энергия, 1964.

14. **Лавриненко В. В.** Пьезоэлектрические устройства как элементы электроники твердого тела: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук/ КПИ. Киев: 1967.

15. **Гонткевич В. С.** Собственные колебания пластинок и оболочек. Справочник. Киев: Наукова думка, 1964.

16. **Справочник** по теории упругости/ Под ред. П. М. Варвака, А. Ф. Рябова. Киев: Будівельник, 1971.

17. **N-Nagy F. L., Joyce G. C.** Solid state control elements operating on piezoelectric principles. — Physical Acoustics, New-York—London, edited by Warren P. Mason, 1972, vol. 9, p. 129—165.

18. **Бансевичус Р. Ю., Рагульскис К. М.** О новом виде исполнительного элемента систем привода и вибродвигателях. — Вибротехника, 1972, т. 3, № 6, с. 296—306.

19. **Некоторые** вопросы высокочастотного вибрационного перемещения/ Бансевичус Р. Ю., Грубляуските Д. Л., Кочикян А. В. и др. — Вибротехника, 1973, т. 3, № 20, с. 317—323.

20. **Лавриненко В. В., Вишневский В. С., Карташев И. А.** Разработка пьезоприводов для видеомагнитофона. Депонированный отчет. № 77065495. Киевский политехнический институт, 1977.

21. **Глозман И. А.** Пьезокерамика. М.: Энергия, 1967.

22. **Смажевская Е. Г., Фельдман М. Б.** Пьезоэлектрическая керамика. М.: Советское радио, 1971.

23. **Лавриненко В. В.** Пьезоэлектрические трансформаторы. М.: Энергия, 1975.

24. **Грамаковский В. А., Серединская И. У., Слуцкий И. А.** О возможности применения пьезоэлектрического двигателя в качестве прямого привода ведущего вала видеомагнитофона. — Техника кино и телевидения, 1978, № 5, с. 15—17.

25. **Вишневский В. С., През А. А.** К вопросу о природе шумов пьезоэлектрического двигателя. — В кн.: Надежность микроэлектронных схем и элементов. Сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1978, с. 179—182.

26. **Стрелков С. П.** Введение в теорию колебаний. М.—Л.: Гостехиздат, 1951.

27. **Пат. № 2530045 (ФРГ).** Elektrischer Motor, Offenlegungsschrift, 1976. V. S. Vishnecsky, V. L. Kavertsev, I. A. Kartashev, V. V. Lavrinenko, M. M. Nekrasov, A. A. Pres.

28. **Вишневский В. С., Карташев И. А., Лавриненко В. В.** Эквивалентные схемы пьезоэлектрических двигателей. — Вестник Киевского политехнического института. Серия радиоэлектроники, 1976, № 13, с. 56—61.

29. **Шейко Ю. А.** Эквивалентная схема многоэлектродного пьезоэлектрического стержня, совершающего изгибные колебания. — Акустический журнал, 1978, т. 24, № 2, с. 279—283.

30. **Элементы** пьезоэлектроники и возможности их применения в электронике/ Некрасов М. М., Лавриненко В. В., Божко А. А. и др. — Электричество, 1972, № 12, с. 1—8.

31. **Вишневский В. С., Карташев И. А., Лавриненко В. В.** Принципы построения преобразователей электрической энергии с пьезоэлектрической нагрузкой. — Вестник Киевского политехнического института. Серия радиоэлектроники, 1977, № 14, с. 12—16.

32. **Лавриненко В. В., Вишневский В. С., Бойченко О. Л.** Разработка пьезоэлектрического привода для транспортировки ленточного сигналоносителя. Депонированный отчет. № 77077857. Киевский политехнический институт, 1976.

33. **Пат. № 3454206 (США).** Williams D. K. Electrostrictive Incremental Film Drive. 1967.

34. **А. с. № 291237 (СССР).** Устройство для продвижения ленты в тракте аппарата магнитной записи/ Бансевичус Р. Ю., Навицкас А. И., Рагульскис К. М. — Опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки». 1971, № 3.

35. **А. с. № 298944 (СССР).** Устройство записи-воспроизведения/ Навицкас А. И., Рагульскис К. М., Бансевичус Р. Ю., Вайчайтис И. И. — Опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1971, № 11.

36. **А. с. № 291239 (СССР).** Приводной узел ленточного сигналоносителя/ Навицкас А. И., Рагульскис К. М., Бансевичус Р. Ю., Куринайтис А. К. — Опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1971, № 3.

37. **А. с. № 523450 (СССР).** Устройство прижима ленты/ Вишневский В. С., Карташев И. А., Кириченко В. А. — Опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1976, № 28.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛАВРИНЕНКО,
ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ КАРТАШЕВ,
ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ ВИШНЕВСКИЙ

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Редактор Л. И. Айзенштат
Редактор издательства Н. Б. Фомичева
Обложка художника В. П. Осинова
Технический редактор В. В. Хапаева
Корректор Г. А. Полонская
ИБ № 1730

Сдано в набор 29.08.79 Подписано в печать 12.03.80 Т-01093 Формат $84 \times 108^1/_{32}$ Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта литературная Печать высокая Усл. печ. л. 5,88 Уч.-изд. л. 6,00 Тираж 7000 экз. Заказ 276 Цена 30 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10